

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2009/2010

Bc. Vojtěch Ritter

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Generování a analýza signálů v bezdrátových přenosových systémech
Signal generation and signal analysis in wireless communication systems

Zadání diplomové práce

Student:

Vojtěch Ritter

Studijní program:

N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601T013 Telekomunikační technika

Téma:

Generování a analýza signálů v bezdrátových přenosových systémech

Signal generation and signal analysis in wireless communication systems

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor přenosových systémů pro přenos bezdrátově přenášených signálů.
2. Prostředky pro generování a analýzu bezdrátově přenášených signálů.
3. Návrh a ověření systému přenosu dat.
4. Vyhodnocení dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

KOVACS, Joseph E. *A Software-Based Test Architecture for Emerging Wireless Technologies* [online]. 2007 [cit. 2009-10-22]. Dostupný z WWW: <www.ni.com>.

LabVIEW Modulation VI Help [online]. Software Revision Version: 3.0. April 2005 [cit. 2009-10-22]. Dostupný z WWW: <http://digital.ni.com/>. ISSN 370940B-01.

CLARK, Cory L. *LabVIEW digital signal processing and digital communications*. New York : McGraw-Hill, 2005. 205 s. ISBN 0-07-144492-0.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jan Žídek, CSc.**

Datum zadání: 20.11.2009

Datum odevzdání: 07.05.2010

prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Ivo Vondrák, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě dne 7.5. 2010

.....

podpis autora

Poděkování

Chtěl bych poděkovat všem, jejichž rady přispěly velkou měrou ke zpracování této diplomové práce. Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Janu Žídkovi, CSc. za účinnou a odbornou pomoc a další cenné připomínky při zpracování diplomové práce. Firmě ELCOM, a.s. děkuji za zpřístupnění laboratoře.

Abstrakt

Tato diplomová práce pojednává o vlastnostech bezdrátových komunikací. Srovnává různé bezdrátové technologie pro přenos dat. Vysvětluje principy digitálních modulací a jejich vliv na konečnou podobu signálu. Pojednává o teorii přenosu signálu přenosovým prostředím. Podává přehled o možnostech generování a analýzy signálů různých přenosových technologií, jejich výhody a použití v dnešním světě. Seznamuje s moderními měřicími přístroji a vysvětluje důležité chyby signálů, které zásadním způsobem ovlivňují jeho kvalitu. Hlavní část se věnuje praktickému návrhu funkčního přenosového systému, který je realizován na platformě modulárního hardwarového systému, kde je funkce systému vytvořena ve flexibilním vývojovém prostředí. Funkčnost systému je v závěru ověřena signálovým generátorem a analyzátozem.

Klíčová slova

Bezdrátový přenos dat, signál, modulace, měření, data, generátor, analyzátor, virtuální přístroj, chyba, kvalita, šířka pásma modulovaného signálu, degradace.

Abstract

This diploma paper is about the attributes of the wireless communication. It compares various wireless technologies for data transfer. It explains the principles of digital modulation and its influence on the final form of the signal. It discusses the theory of the signal transfer by the transmission environment. It reports about the possibilities of the generating and signal analysis of the various transmission technologies, its advantages and usage in the today's world. It informs about the modern measuring devices and explains the important signal errors, which fundamentally influence its quality. The principal part addresses the practical proposal of the functional transmission system, which is realized on the modular hardware system platform, where the system function is made up in the flexible development environment. The functionality of the system is verified by the signal generator and analyser at the end of the paper.

Keywords:

Wireless data transmission, signal, modulation, measurement, data, generator, analyzer, virtual instrument, error, quality, bandwidth of modulated signal, degradation.

Seznam použitých symbolů a zkratek

A/D	Analog/Digital, analogově digitální převodník
AM	Amplitude modulation, amplitudová modulace
ASK	Amplitude shift keying, klíčování amplitudy digitálního signálu
AWGN	Additive White Gaussian Noise, bílý gaussův šum
BER	Bit Error Ratio, bitová chybovost
BPSK	Binary Phase Shift Keying, dvoustavové fázové klíčování
C#	C Sharp, objektově orientovaný programovací jazyk firmy Microsoft
C/C++	Objektově orientovaný programovací jazyk operačního systému Unix
CAN	Controller Area Network, komunikační sběrnice
CCITT	Comité Consultatif International Téléphonique et Télégraphique, Mezinárodní telekomunikační unie
CF	Carrier Frequency, nosná frekvence
CRC	Cyclic Redundancy Check, zabezpečovací kód
CVI	C for Virtual Instrumentations, vývojové prostředí firmy National Instruments
DAC	Digital to Analog Converter, digitál analogový převodník
DANL	Display Averaged Noise Level, průměrná hodnota šumu displeje
DC	Direct Current, stejnosměrné napětí
DFT	Discrete Fourier Transform, diskrétní Fourierova transformace
DLL	Dynamic Library, část programu určená pro sdílení více programy
EDGE	Enhanced Data Rates for Global Evolution, mobilní datová služba
ETSI	European Telecommunications Standards Institute, Evropský telekomunikační úřad
EVM	Error Vector Magnitude, amplituda chybového vektoru
FFT	Fast Fourier Transform, rychlá Fourierova transformace
FM	Frequency Modulation, frekvenční modulace
FPGA	Field-programmable gate array, hradlové pole
FSK	Frequency Shift Keying, klíčování frekvence digitálního signálu
GPB	General Purpose Interface Bus, měřicí systém složený z autonomních přístrojů
GPRS	General Packet Radio Service, mobilní datová služba
GPS	Global Positioning System, systém sledování polohy
HP VEE	Hewlett Packard Visual Environment Engineering, grafické vývojové prostředí firmy Hewlett Packard
I/O	Input/Output, vstup/výstup zařízení ke komunikaci přístroje s okolím

IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, úřad pro elektronické a elektrotechnické inženýrství
IF	Intermediate Frequency, mezifrekvence
ISA	Industry Standard Architecture, komunikační sběrnice
ISI	Intersymbol Interference, Intersymbolová interference
LabVIEW	Laboratory Virtual Engineering Workbench, vývojové prostředí
LAN	Local Area Network, lokální síť
LMS	Least Mean Squares, algoritmus používaný pro adaptivní filtry
LO	Local Oscillator, místní oscilátor
LPT	Line Printer Terminal, paralelní port
MAN	Metropolitan Area Network, metropolitní síť
MAR	Measure and Regulation, měření a regulace
MAX	Measurement Automation Explorer, prohlížeč nainstalovaného zařízení
MER	Modulation Error Ratio, modulační chyba
MIMO	Multiple Input Multiple Output, několinásobný vstup a výstup
MoU	Memorandum of Understanding, dokument popisující dohody mezi stranami
NI	National Instruments
NB	Notebook, přenosný počítač
OQPSK	Offset Quadrature Phase Shift Keying, offsetové čtyř stavové klíčování fáze
OS	Operační systém
PAM	Pulse Amplitude Modulation, pulzně amplitudová modulace
PAN	Personal Area Network, osobní síť
PC	Personal Computer, osobní počítač
PCI	Peripheral Component Interconnect, počítačová paralelní sběrnice
PCIE-E	Peripheral Component Interconnect Express, počítačová sériová sběrnice
PCM	Pulse Code Modulation, pulzně kódová modulace
PCMCIA	Personal Computer Memory Cards International Association, typ slotu pro paměťová média
PDA	Personal Digital Assistant, osobní digitální kapesní počítač
PEP	Peak Envelope Power, špičkový obálkový výkon
PLC	Programmable Logic Controller, programovatelný logický prvek
PLL	Phase Locked Loop, zpětnovazební řídicí obvod
PM	Phase Modulation, fázová modulace
PSD	Power Spectral Density, výkonová spektrální hustota

PSK	Phase Shift Keying, klíčování fáze digitálního signálu
PWM	Pulse Wide Modulation, pulzně šířková modulace
PXI	PCI eXtensions for Instrumentation, komunikační sběrnice pro platformu přístrojů virtuální instrumentace
PXISA	PXI Systems Alliance, organizace zastřešující PXI standard
QAM	Quadrature Amplitude Modulation, kvadrurní amplitudová modulace
QoS	Quality of Service , kvalita služby
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying, čtyř stavové fázové klíčování
RAM	Read Acces Memory, zapisovatelná paměť
RC	Rezonanční obvod složený z kapacitoru a odporu
RFID	Radio Frequency Identification, identifikace na rádiové frekvenci
RFSA	Radio Frequency System Automation, rádiová síť pro automatizace
RS	Rychlá Sériová sběrnice
SCSI	Small Computer System Interface, počítačové rozhraní pro připojení různých periférií, například skenery, disky
SD	Secure Digital, typ paměťového média
SDR	Software Defined Radio, softwarově definované rádio
SFDR	Spurious-Free Dynamic Range, dynamický rozsah odchylky při nejvyšším rušení signálu ve frekvenční doméně
SNR	Signal to Noise Ratio, odstup signál šum
SSB	Single Side Band, postranní pásmo
TOI	Third Order Intercept, hodnota nařizující kompresi signálu v zesilovači
U	Elektrické napětí [V]
USB	Universal Serial Bus, universální sériová sběrnice
VBA	Visual Basic for Applications, programovací jazyk firmy Microsoft pro vývoj aplikací s grafickým uživatelským rozhranním
VF	Vysoká frekvence
VME	Versa Module Europe Bus, komunikační sběrnice pro průmyslové systémy
VXI	VME eXtensions for Instrumentation, komunikační sběrnice pro měřicí systémy se zásuvnými moduly
WAN	World Area Network, světová síť
Wi-Fi	Wireless Fidelity, označení a logo udělované výrobkům pracujícím podle standardu IEEE 802.11a/b/g
β	Šířka přenosového pásma [Hz]

$\pi/4$ DQPSK	$\pi/4$ Different Quadrature Phase Shift Keying, osmi stavové diferenciální fázové klíčování posunuté o $\pi/4$
.NET	dot NET, softwarová platforma firmy Microsoft
16 QAM	16 Quadrature Amplitude Modulation, 16 stavová kvadrurní amplitudová modulace
3GPP	The 3rd Generation Partnership Project, typ sítě mobilních telefonů

Obsah

1 Úvod.....	1
2 Teoretický rozbor přenosových systémů pro přenos bezdrátově přenášených signálů .	2
2.1 Technologie pro bezdrátový přenos.....	2
2.1.1 WI-FI	3
2.1.2 GPRS	3
2.1.3 EDGE.....	3
2.1.4 ZigBee.....	3
2.1.5 GPS	4
2.2 Přenos signálu	4
2.2.1 Modulace	5
2.2.2 Šířka pásma modulovaného signálu	7
2.2.3 Symbolová a datová rychlost.....	9
2.2.4 Kvalita přenosové cesty	11
2.2.5 Modulace v bezdrátových přenosových systémech.....	11
2.3 Degradace signálu.....	13
2.3.1 Chyby frekvencí a fáze	13
2.3.2 Chybový vektor EVM.....	14
2.3.3 Chyba amplitudy.....	15
2.3.4 Modulační chyba.....	15
2.3.5 Konstelační diagram	16
2.3.6 Rozdíl amplitud.....	16
2.3.7 Bílý Gaussův šum	16
2.3.8 Chyba ortogonality	17
2.3.9 Bitová chybovost	17
2.3.10 ρ	18
2.3.11 Posuv počátku	18
3 Prostředky pro generování a analýzu signálu bezdrátově přenášených signálů	19
3.1 Generátory signálu	19
3.1.1 Vysokofrekvenční generátory	20
3.2 Analyzátoři signálu	22
3.2.1 Osciloskopická měření.....	22
3.2.2 Digitální osciloskop	22

3.2.3 Spektrální měření	23
3.2.4 Signálový analyzátor.....	23
3.3 Externí moduly připojitelné k počítači	24
4 Návrh a ověření systému přenosu dat	26
4.1 Přenosový řetězec	26
4.1.1 Zdrojové kódování	27
4.1.2 Kanálové kódování	27
4.1.3 Modulace	28
4.1.4 Upkonverze	28
4.1.5 Přenosový kanál	28
4.2 Návrh systému pro bezdrátový přenos dat.....	28
4.3 Hardwarová část systému přenosu dat.....	29
4.3.1 PXI platforma	30
4.3.2 PXI skříň	30
4.3.3 PXI systémový kontrolér	31
4.3.4 PXI periferní moduly	31
4.3.5 Moduly použité pro přenosový systém.....	32
4.4 Softwarová část systému.....	33
4.5 Virtuální vysílač a přijímač.....	34
4.5.1 Vysílací část- podprogram generátor signálu	34
4.5.2 Vysílač	36
4.5.3 Přijímač.....	38
4.6 Ověření funkce navrženého bezdrátového přenosového systému	39
4.7 Ověření reálné funkce navrženého systému	41
5 Vyhodnocení dosažených výsledků.....	42
6 Závěr	44
Literatura.....	45
Seznam příloh	46

1 Úvod

Přenos zpráv, informací a dat uskutečňovaný prostřednictvím fyzického přenosu nejrozličnějších nosičů, má své pevné místo a opodstatnění v dnešní době plně počítačů, počítačových sítí, družicových spojů a jiných druhů techniky. Mění se forma nosičů, na kterých se zprávy přenáší. Tradiční nosiče zpráv typu psaných nebo tištěných textů jsou nahrazovány svými ekvivalenty v elektronických podobách. Z našeho okolí pomalu mizí papír, který je nahrazován elektronickými datovými úložišti, klasický telefonní hovor vytlačuje videohovor. Pro přenos takto zpracovaných informací vznikají různé druhy přenosových sítí. Umožňují výměnu informací mezi dvěma, nebo skupinou různých uživatelů po celém světě nezávisle na čase. Uživatelem může být jak člověk, tak i různé druhy zařízení. V prvopočátku se pro výměnu informací používaly pevné přenosové sítě, kde přenosovým médiem pro informace byl kovový vodič uložený v zemi nebo na sloupech nadzemního vedení. Se stoupajícími nároky uživatelů došlo k postupnému zvyšování kvality a snižování ceny přenosových prostředků. Lákavá pořizovací cena způsobila rozmach k masám lidí po celém světě. K tomuto rychlému rozvoji značně přispěla možnost bezdrátového přenosu dat. První aplikací pracující s bezdrátovým přenosem signálu bylo rádio, které brzy následoval televizní přenos, poté telefonní hovor a nejnověji dravě se rozvíjející přenos dat v podobě filmů, her a aplikací běžících v reálném čase.

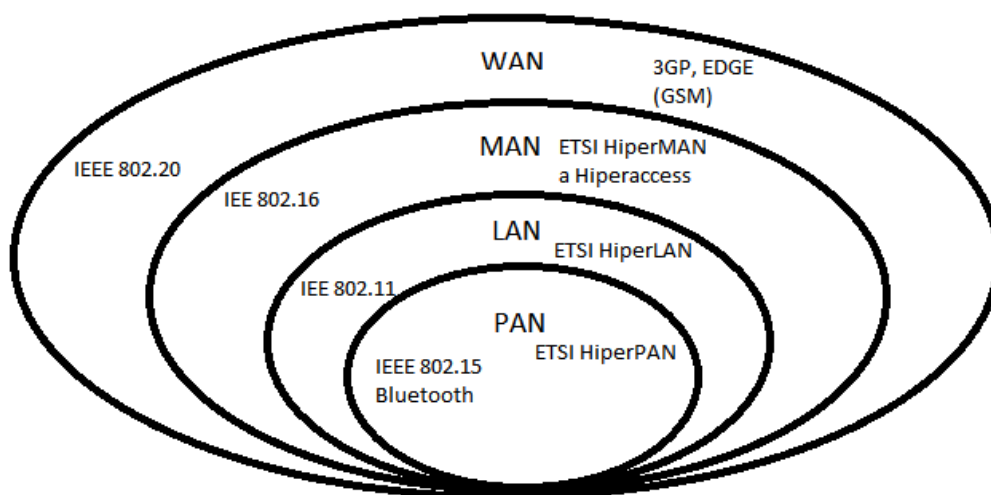
Cílem této magisterské práce je popsat, analyzovat a realizovat možnosti generování a analýzy signálů typických pro bezdrátové přenosové systémy. Práce je rozdělena do několika částí. První část je zaměřena na historii vzniku bezdrátových signálů, ukazuje nejběžnější současné bezdrátové přenosové standardy a vysvětluje teorii přenosu signálu přenosovým prostředím, možnosti zpracování signálu k tvaru vhodnému pro přenos- modulace, vysvětlení základních pojmů jako je šířka přenosového pásma, symbolová rychlost a podobně. Druhá část seznamuje čtenáře s prostředky pro generování a analýzu signálu, poukazuje na možnosti měření jednotlivých přístrojů. Třetí část je věnována návrhu a ověření funkčního systému pro přenos dat, který je zde ověřován speciálními měřicími přístroji. Čtvrtá část vyhodnocuje dosažené výsledky získané z ověřovacího procesu, důraz je kladen na degradaci signálu, které jsou hlavním ukazatelem kvality navrženého systému pro přenos dat.

2 Teoretický rozbor přenosových systémů pro přenos bezdrátově přenášených signálů

Teoretický základ pro bezdrátové přenosy položil již v roce 1870 americký fyzik James Clerk Maxwell, když zformuloval svou teorii šíření elektromagnetických vln. O praktické potvrzení této teorie se v roce 1888 postaral německý fyzik Heinrich Rudolf Hertz, který při svých pokusech dokázal elektromagnetické vlnění generovat a studovat jeho vlastnosti. S praktickým využitím elektromagnetických vln, záhy označovaných také jako rádiové, přišel jako jeden z prvních ruský fyzik Alexandr Stěpanovič Popov, který v roce 1895 předvedl světu první přijímač elektromagnetických vln. Dnešní moderní elektronické přístroje používají bezdrátový přenos dat všude, kde ji jen lze vzpomenout- od bezdrátového spojení reproduktorů domácích kin po dálkové nastartování motoru automobilů [16].

2.1 Technologie pro bezdrátový přenos

Bezdrátové přenosové systémy slouží k bezdrátovému propojení účastníků a nabízí v principu stejné služby a flexibilitu jako sítě drátové. Základním dělením je mobilita uživatele-rádiové sítě mohou být fixní nebo mobilní. V kmitočtovém pásmu je zapotřebí rozlišovat jestli je pásmo licenční nebo bezlicenční. V prvé řadě je potřeba tyto technologie rozlišit podle užití na světové sítě WAN, metropolitní sítě WMAN, lokální sítě WLAN a osobní WPAN. Specifikaci standardu jednotlivých sítí má na starosti několik institucí, nejdůležitějšími z nich jsou IEEE pro datové sítě, a ETSI pro digitální celulární systémy (telefonie GSM). Základní přiřazení různých technologií je na obrázku 1.



Obrázek 1: Rozdělení sítí podle velikosti

2.1.1 WI-FI

Wi-Fi je standard pro lokální bezdrátové sítě (Wireless LAN, WLAN) a vychází ze specifikace IEEE 802.11. Původním cílem Wi-Fi sítí bylo zajišťovat vzájemné bezdrátové propojení přenosných zařízení a dále jejich připojování na lokální (např. firemní) síť LAN. S postupem času začala být využívána i k bezdrátovému připojení do sítě Internet v rámci rozsáhlejších lokalit a tzv. hotspotů. Wi-Fi zařízení jsou dnes prakticky ve všech přenosných počítačích a i v některých mobilních telefonech. Úspěch Wi-Fi přineslo využívání bezlicenčního pásma, což má negativní důsledky ve formě silného zarušení příslušného frekvenčního spektra a dále častých bezpečnostních incidentů. Následníkem Wi-Fi by měla být bezdrátová technologie WiMax, která se zaměřuje na zlepšení přenosu signálu na větší vzdálenosti.

2.1.2 GPRS

General Packet Radio Service (GPRS) je mobilní datová služba přístupná pro uživatele GSM mobilních telefonů. Je označována jako „2.5G“, technologie mezi druhou (2G) a třetí (3G) generací mobilních telefonů. Poskytuje průměrnou rychlost datových přenosů používáním TDMA kanálů v GSM síti. Původní myšlenka byla vylepšit GPRS, aby pokrýval ostatní standardy, ale místo toho se tyto standardy nyní upravují, aby používaly standard GSM. Proto je GSM nyní jediné místo, kde se GPRS používá. GPRS byl poprvé zahrnut v GSM standardu Release 97 a novější. Původně byl standardizován ETSI, ale nyní byla starost o něj předána 3GPP.

2.1.3 EDGE

Enhanced Data rates for Global Evolution, někdy také jako Enhanced Data Rates for GSM Evolution (EDGE) je dalším vývojovým stupněm v technologii GSM po zavedení datových přenosů pomocí GPRS. Technologie EDGE nabízí několik metod a vylepšení, které umožňují dosáhnout efektivního přenosu dat a vysoké spektrální účinnosti v tomto úzkopásmovém buňkovém systému.

2.1.4 ZigBee

ZigBee je bezdrátová komunikační technologie vystavěná na standardu IEEE 802.15.4. Zigbee je poměrně novým standardem platným od listopadu 2004. Podobně jako Bluetooth je určena pro spojení nízkovýkonových zařízení v sítích PAN na malé vzdálenosti do 75 metrů. Díky použití multiskokového ad-hoc směrování umožňuje komunikaci i na větší vzdálenosti bez přímé radiové viditelnosti jednotlivých zařízení. Primární určením směřuje do aplikací v průmyslu

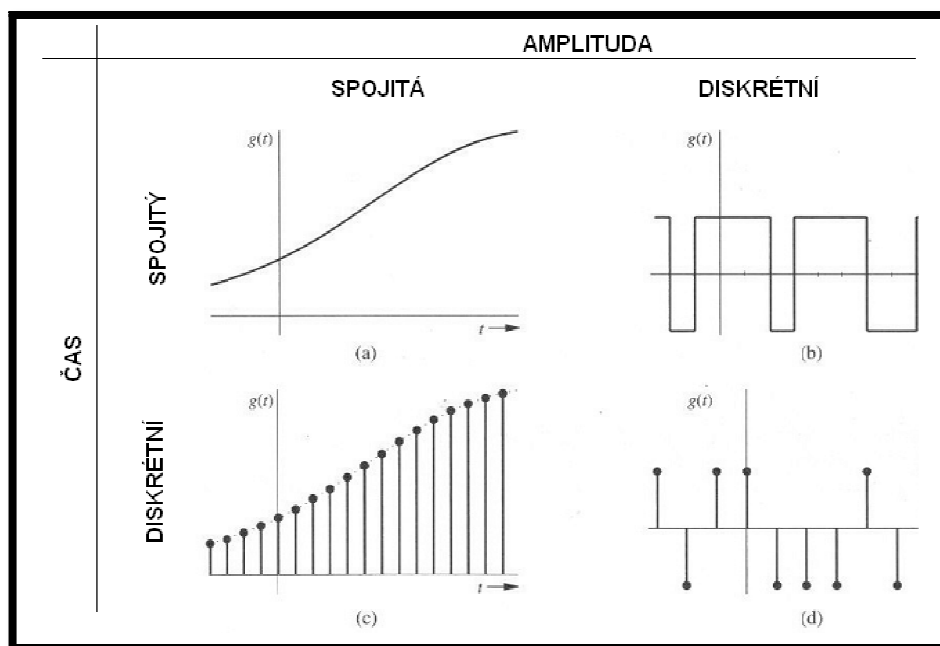
a senzorových sítích. Pracuje v bezlicenčních pásmech (generální povolení) na frekvencích 858MHz, 902–928 MHz a 2,4 GHz. Přenosová rychlost činí 20, 40, 250 kbit/s.

2.1.5 GPS

Global Positioning System, zkráceně GPS, je vojenský polohový družicový systém provozovaný Ministerstvem obrany Spojených států amerických, s jehož pomocí je možno určit polohu a přesný čas kdekoliv na Zemi nebo nad Zemí s přesností první desítky metrů. Přesnost GPS lze s použitím dalších metod ještě zvýšit až na jednotky centimetrů. Část služeb tohoto systému s omezenou přesností je volně k dispozici i civilním uživatelům. V současné době se systém využívá v mnoha oborech lidské činnosti.

2.2 Přenos signálu

Pro přenos informační zprávy z bodu A do bodu B je zaveden pojem signál, který je prostředkem pro přenos informace. Pro účely této diplomové práce je signál elektromagnetický prostředek pro šíření změn elektromagnetických vlastností prostředí. Rozlišujeme signály spojité a signály nespojité. Signál je spojitý v určitém časovém intervalu tehdy, pokud může nabývat libovolných hodnot právě v tomto intervalu. Diskrétní signál je nespojitý na určitém časovém intervalu, pokud je definován jen v určitých (diskrétních) intervalech. Nespojitost může být v jeho hodnotě nebo čase. Rozdíl mezi signály zachycuje obrázek 2.



Obrázek 2: Srovnání signálů

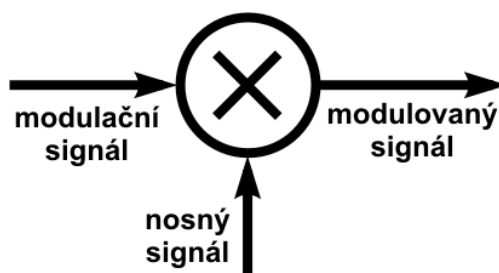
2.2.1 Modulace

První sdělovací systémy pracovaly s analogovými signály v základním pásmu- jeho spektrum leží v přirozeném frekvenčním pásmu, tak jak vzniká. Analogové signály jsou spojité v čase, a mohou nabývat nekonečně mnoho hodnot a právě zde je hlavní zdroj problémů ovlivňující kvalitu signálu jako je náchylnost na zkreslení, útlum, šum znemožňují správné vyhodnocení v přijímači. Pro potlačení nežádoucích parametrů a zvýšení přenosové rychlosti se začaly používat modulace. Modulace je úprava signálu, při které jedním signálem - modulačním (v základním pásmu) ovlivňujeme parametr signálu jiného – nosného. Modulace zajišťuje převod přenášené zprávy na signál schopný šíření daným prostředím a zároveň zvyšuje jeho odolnost proti degradaci.

Důležitými pojmy jsou:

- 1) Modulační signál- signál, který chceme modulovat na nosný signál
- 2) Nosný signál- signál, který modulujeme modulačním signálem
- 3) Modulovaný signál- signál, výsledný signál po procesu modulace

Celou situaci přehledně ukazuje obrázek 3.



Obrázek 3: blokové schéma modulace

Pro již zmiňovanou náchylnost analogových signálů k různým nežádoucím jevům se postupně přešlo k signálům digitálním, a tedy i k digitálním modulacím. Modulace je založena na skutečnosti, že jakýkoliv nosný signál a s harmonickým průběhem lze popsat ve tvaru:

$$a = A \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

kde

A je amplituda signálu

ω je úhlová frekvence signálu

φ je fáze signálu

V komplexní rovině lze signál a zobrazit jako fázor, složený ze dvou složek I (In phase- synfázní složka) a Q (Quadrature phase- kvadrurní složka):

$$a = I \sin \omega t + Q \cos \omega t \quad (2)$$

kde

Amplituda signálu

$$A = \sqrt{I^2 + Q^2} \quad (3)$$

Fáze signálu

$$\varphi = \arctg\left(\frac{Q}{I}\right) \quad (4)$$

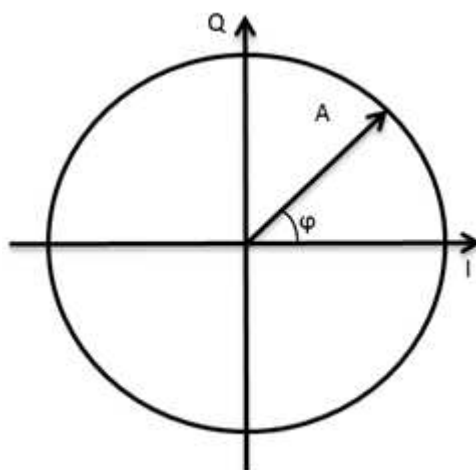
I složka signálu

$$I = A \cos \varphi \quad (5)$$

Q složka signálu

$$Q = A \sin \varphi \quad (6)$$

Na obrázku 4 je fázorový diagram, kde je fázor nosného signálu znázorněn černou šipkou. Modulací ovlivňujeme hodnotu amplitudy nebo frekvence případně fáze nosného signálu, tedy dojde k posunutí fázoru ve fázorovém diagramu, podle toho jaký parametr nosného signálu chceme modulací ovlivnit. Fázorový diagram je jedním z nejdůležitějších grafů, vypovídající o povaze signálu. Lze z něj vyčíst různé typy degradací, ovlivňující kvalitu přenášené zprávy.



Obrázek 4: Fázor nosného signálu

Podle toho, který ze základních parametrů nosného signálu ovlivňujeme modulačním signálem, lze modulace rozdělit na:

- 1) Spojité
 - a) Analogové
 - i. Amplitudové AM
 - ii. Úhlové- frekvenční modulace FM a fázová PM
 - b) Digitální
 - i. Klíčování amplitudy ASK
 - ii. Klíčování frekvence FSK
 - iii. Klíčování fáze PSK
- 2) Diskrétní modulace
 - a) Pulzně kódová PCM
 - b) Pulzně amplitudová PAM
 - c) Pulzně šířková PWM

Všechny digitální modulace mají několik společných parametrů, které je charakterizují:

- 1) Šířka pásma modulovaného signálu
- 2) Symbolová rychlost
- 3) Datová rychlost
- 4) Odstup signál/šum

2.2.2 Šířka pásma modulovaného signálu

Vyjadřuje rozdíl mezi složkou modulovaného signálu s nevyšším kmitočtem f_H a složkou modulovaného signálu s nejnižším kmitočtem f_L přenášeným v přenosovém kanálu, které lze přenést s přípustnými ztrátami signálu. Jednotkou šířky pásma je jeden Hertz [Hz]. Čím větší je šířka pásma, tím větší je symbolová rychlost, kterou lze v přenosovém kanálu dosáhnout. Matematicky:

$$\beta = f_H - f_L \quad [\text{Hz}] \quad (7)$$

kde

f_H - složka modulovaného signálu s nejvyšším kmitočtem [Hz]

f_L - složka modulovaného signálu s nejnižším kmitočtem [Hz]

Vliv použité modulace na šířku pásma β ukazuje tabulka 1:

Modulace	PAM	QAM	PSK	ortogonální nekoherentní FSK	ortogonální signály	birtogonální signály	simplexní signály
Nyquistova šířka pásma B	$\frac{1}{2T_s}$	$\frac{1}{T_s}$	$\frac{1}{T_s}$	$\frac{M}{T_s}$	$\frac{M}{2T_s}$	$\frac{M}{4T_s}$	$\frac{M-1}{2T_s}$
Spektrální účinnost η_s	$2 \cdot \log_2 M$	$\log_2 M$	$\log_2 M$	$\frac{\log_2 M}{M}$	$\frac{2 \cdot \log_2 M}{M}$	$\frac{4 \cdot \log_2 M}{M}$	$\frac{2 \cdot \log_2 M}{M-1}$

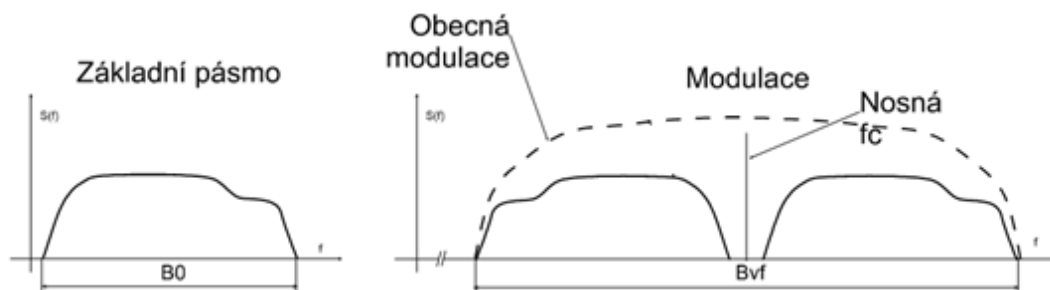
Tabulka 1: Vliv modulace na šířku pásma, zdroj [17]

kde

M je počet stavů modulace

T_s doba trvání symbolu [s]

Při modulaci dojde k přesunu frekvenčního spektra modulačního signálu na jiné, často vyšší frekvence. Tvar přeloženého spektra modulovaného signálu nemusí odpovídat tvaru spektra modulačního signálu v základním pásmu. Platí zde, že šířka pásma modulačního signálu v základním pásmu B_0 má vliv na šířku pásma modulovaného signálu B_{vf} – obrázek 5.



Obrázek 5: Postranní pásma

Okolo nosného signálu se modulací vytvoří dvě postranní frekvenční pásma, mající stejný tvar frekvenční charakteristiky jako frekvenční pásmo modulačního signálu, navíc jsou postranní frekvenční pásma ve stejné poloze vůči nosné jako frekvenční pásmo signálu v základním pásmu k ose procházející nulou na ose frekvencí (obrázek 5). Tato postranní pásma nesou identickou informaci, proto je možné jedno z pásem potlačit a ušetřit frekvenční pásmo přenášeného signálu. Nosná frekvence při přenosu zbytečně zabírá energetický výkon signálu. Proto se při modulaci signálu potlačuje a to částečně nebo úplně.

V digitálních (ale i analogových) modulacích je šířka pásma do velké míry ovlivněna použitou modulací a předmodulačními filtry spektra signálu (dolní, horní, pásmová propust). Parametr filtru, který ovlivňuje šířku pásma a útlum impulzní charakteristiky nazýváme činitel tvaru α tzv. roll off faktor. Zvětšující α znamená větší šířku pásma a rychlejší útlum impulzní charakteristiky. Pro vysílač H_T a přijímač H_R se nejčastěji používají filtry Root Raised Cosine s charakteristikou:

$$|H_T(f)| = |H_R(f)| = \sqrt{H_{RRC}(f)} \quad (8)$$

kde

H_{RRC} - impulzní charakteristika Root Raised Cosine filtru

Šířku pásma β_{RRC} Raised Cosine Filtru (pro PSK modulaci) definujeme jako šířku nenulové části kmitočtového spektra. Vypočítáme ji ze vztahu:

$$\beta_{RRC} = [(1 + \alpha) \cdot S_R] \cdot 1,10 \quad [Hz] \quad (9)$$

kde

S_R - symbolová rychlost $[S/s]$

α – roll off faktor

Šířka pásma (pro PSK modulaci) β_{RC} filtru Raised Cosine

$$\beta_{RC} = \frac{S_R \cdot (1 + \alpha)}{2} \quad [Hz] \quad (10)$$

2.2.3 Symbolová a datová rychlost

Symbolová (S_R) a datová (D_R) rychlost jsou důležitým parametrem pro digitálně modulované signály určené k vysokofrekvenčnímu bezdrátovému přenosu dat. Vzájemný vztah symbolové a datové rychlosti významně ovlivňuje především typ digitální modulace a základní parametry ochranného kódování. Ochranné kódy zvyšují odolnost přenášených digitálních signálů vůči různým degradacím a chybám způsobenými neideálními vlastnostmi reálných přenosových kanálů. Vnější blokový kód K_O se používá pro opravu symbolů, může být realizován např. Hammingovým nebo Golayovým kódem [13]. Vnitřní binární kód K_I slouží k opravě

jednotlivých bitů např. konvoluční kód [13]. Je-li pro binární vyjádření jednoho vzorku signálu s M signálovými úrovněmi užito n bitů

$$n = \log_2(M) \quad (11)$$

pak platí:

$$D_R = n \cdot S_R \quad [\text{bit} / \text{s}] \quad (12)$$

V digitálních modulacích je potřeba vztah 12 rozšířit o vliv ochranného kódování:

$$D_{RC} = S_R \cdot \log_2(M) \cdot K_{OP} \cdot K_{IP} \quad [\text{bit} / \text{s}] \quad (13)$$

kde

D_{RC} - čistá datová rychlost

K_{OP} - korekční poměr vnějšího kódu

K_{IP} - korekční poměr vnitřního kódu

Korekční poměr vyjadřuje poměr počtu vstupních k výstupním bitům v kodéru.

Symbolová rychlost představuje počet symbolů přenesených za jednotku času. Symbol vytváří diskretní modulační hodnotu modulace a je potřeba jej chápat jako bod ve fázorovém digramu, kterému je pevně přidělena jeho bitová hodnota. Pozici tohoto bodu ve fázorovém diagramu lze jednoznačně určit amplitudou A , úhlovou frekvencí ω a fází φ viz kapitola 2.2.1. Počet symbolů je závislý na druhu modulace. S_R úzce souvisí s šířkou pásma modulovaného signálu- Nyquistovo kritérium vyjadřuje teoretický vztah mezi šířkou pásma a dosažitelnou symbolovou rychlostí: maximální S_R je číselným dvojnásobkem šířky pásma modulovaného signálu:

$$S_{RT} = 2 \cdot \beta \quad [\text{S} / \text{s}] \quad (14)$$

Reálná symbolová rychlost je definována jako:

$$S_R = \frac{1}{T_S} \quad [\text{S} / \text{s}] \quad (15)$$

kde

S_{RT} - teoretická symbolová rychlost pro modulaci PSK $[\text{S} / \text{s}]$

β - šířka pásma [Hz]

T_s - doba trvání symbolu, lze zjistit z diagramu oka [s]

2.2.4 Kvalita přenosové cesty

Je vyjádřena poměrem užitečného signálu k nežádoucímu šumu (odstup signál/šum). Jednotkou je bezrozměrná hodnota vyjádřená v decibelech. Zkratka je SNR z anglického názvu Signal to Noise Ratio. Se snižujícím se SNR klesá kvalita přenosové cesty, narůstá chybovost (např. BER) a dochází ke zhoršení propustnosti přenosové cesty. Matematicky:

$$SNR = 20 \log \left(\frac{U_{SIG}}{U_{SUM}} \right) \quad [dB] \quad (16)$$

nebo

$$SNR = 10 \log \left(\frac{P_{SIG}}{P_{SUM}} \right) \quad [dB]$$

(17)

kde

SNR- odstup signál šum [dB]

U_{SIG} - napětí signálu na konci přenosové cesty [V]

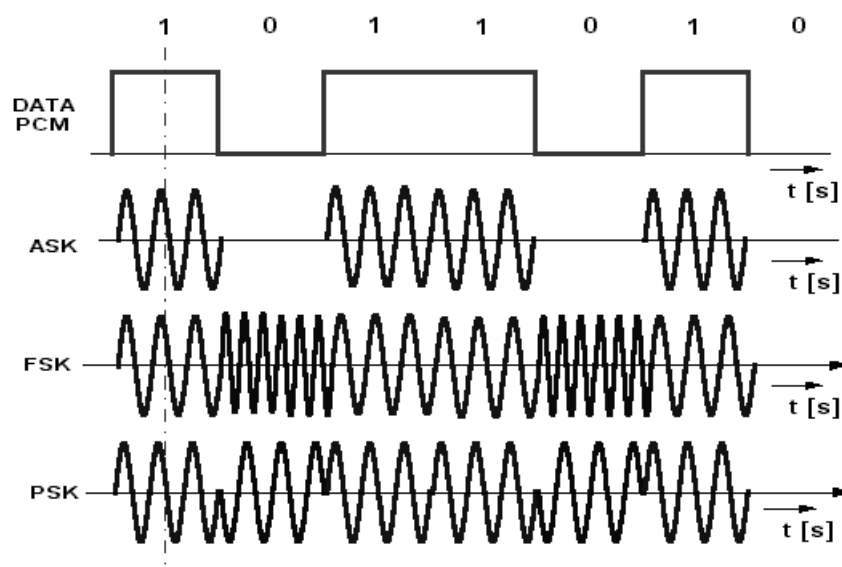
U_{SUM} - napětí šumu na konci přenosové cesty [V]

P_{SIG} - výkon signálu na konci přenosové cesty [dB]

P_{SUM} - výkon šumu na konci přenosové cesty [dB]

2.2.5 Modulace v bezdrátových přenosových systémech

V moderních bezdrátových přenosových systémech, reprezentovanými například aplikacemi Wi-Fi, Bluetooth a RFID se používají digitální modulační signály. Modulačním signálem je signál digitální- nabývající konečného počtu diskrétních hodnot. Z tohoto důvodu nabývá i modulovaný signál konečného počtu hodnot- symbolů ve fázorovém diagramu, obrázek 7. Toto je hlavní rozdíl a výhoda oproti analogovým modulacím. Nosný signál se ovlivňuje v rámci několika symbolů, této vlastnosti se říká klíčování. Klíčovat lze amplitudu- ASK, frekvenci- FSK a fázi signálu- PSK. Situaci graficky zachycuje obrázek 6.



Obrázek 6: Klíčování digitálního signálu

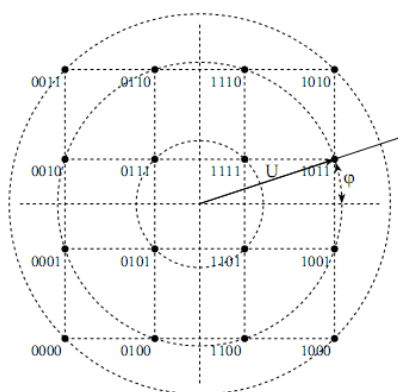
Složitější, zato však efektivnější metody používají více stavové modulace. Počet symbolů M ve fázorovém diagramu je:

$$M = 2^n \quad (18)$$

kde

n je počet bitů obsažených v jednom symbolu

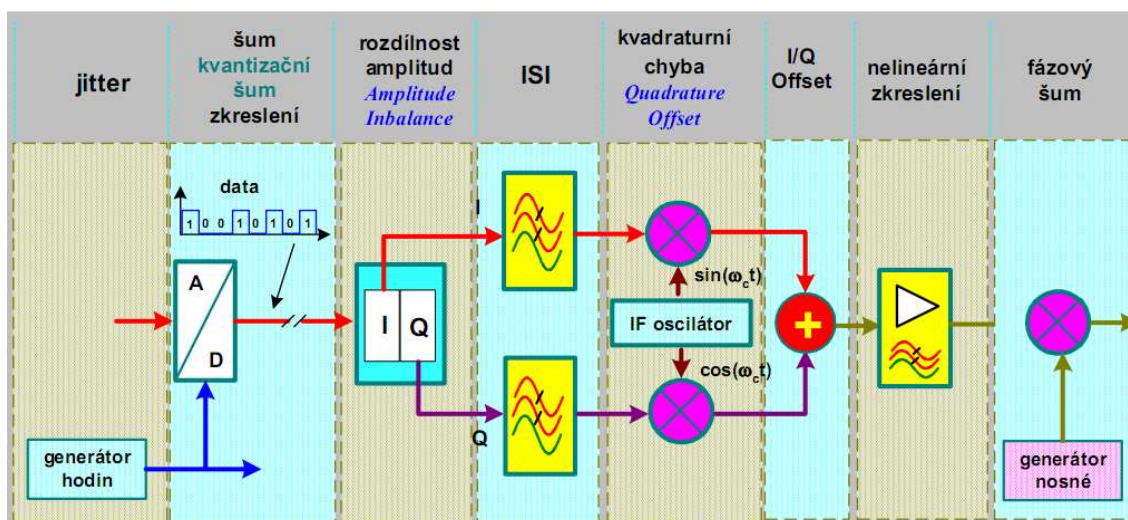
Například modulace 16QAM má 16 symbolů M , které jsou vyjádřeny 4 bity, obrázek 7. Vícestavové modulace umožňují šetřit šířku pásma, ale na druhou stranu jsou náchylnější na nesprávnou identifikaci přijatého symbolu.



Obrázek 7: Modulace 16 QAM, zdroj [18]

2.3 Degradace signálu

Data (signál) průchodem přes přenosový řetězec doznávají určitých změn, které na nich zanechávají jednotlivé části přenosového řetězce. Každý z jeho bloků může přidat signálu chybu, a to podle kvality jednotlivých zařízení – součástek a správné činnosti systému jako celku. Na obrázku 8 je znázorněna možnost vzniku chyb ve vysílači. Následující chyby a degradace budou hodnotícími kritérii při ověřování funkce a kvality navrhovaného systému pro přenos dat.



Obrázek 8: Chyby v generátoru, zdroj [20]

2.3.1 Chyby frekvencí a fáze

- 1) Frekvenční drift - samovolné posouvání kmitočtu, způsobené teplotními změnami a napěťovou nesymetrií vstupů např. operačních zesilovačů a oscilátorů (způsobuje parazitní stejnosměrné napětí na výstupu) uvnitř polovodičových součástek
- 2) Frekvenční offset - trvalá frekvenční odchylka nastává, když se rádiový signál z oscilátorů dvou různých zařízení (vysílač versus přijímač) mírně liší v rozdílných nosných kmitočtech
- 3) Fázový offset - trvalá odchylka fáze- nastává, pokud je časová difference mezi přijímaným signálem a referenčním signálem
- 4) Fázový neklid - neboli (jitter) lze definovat jako krátkodobé nekumulativní odchylky charakteristických okamžiků digitálního signálu od jejich ideální polohy na časové ose. Mezi jeho zdroje patří obvody pro obnovu referenčního hodinového signálu, vliv aditivního šumu a ISI na číslicové rozhodovací obvody v časovacích obvodech. Měří se v časové doméně. Ve vektorovém diagramu se projeví změnou úhlu fáze $\varphi(t)$.

- 5) Fázový šum - je nežádoucí vlastnost harmonických oscilátorů, způsobený především krátkodobou frekvenční nestabilitou. Velikost nestability se určuje v časovém intervalu. Fázový šum způsobuje rozptřeni symbolu. Měří se ve frekvenční oblasti. Matematicky lze vyjádřit:

$$L(f) = 10 \log \frac{P_{ss}}{P_{cf}} \quad [\text{dBc/Hz}] \quad (19)$$

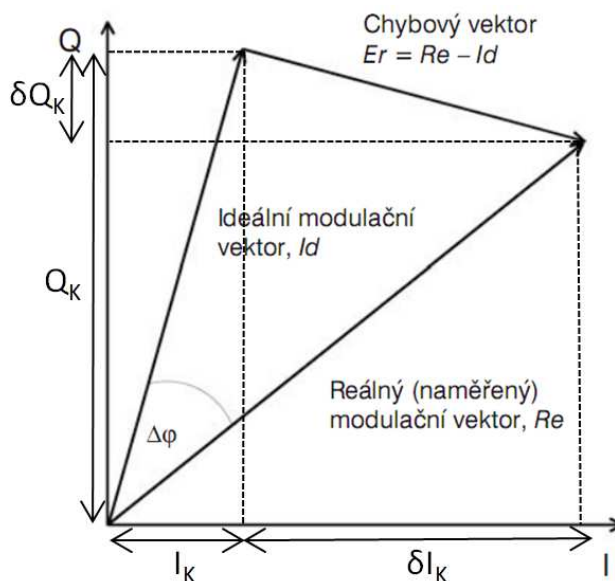
kde

P_{ss} je výkon v postranním pásmu

P_{cf} je výkon nosné frekvence

2.3.2 Chybový vektor EVM

Amplituda chybového vektoru představuje vzdálenost od ideální polohy symbolu k aktuální poloze přijatého symbolu. Výsledek může být vyjádřen jako výkonový poměr v decibelech nebo v procentech představující počet chybně přijatých symbolů.



Obrázek 9

kde

$\Delta\varphi$ - chyba fáze

Matematicky [7] :

$$EVM_{RMS} = \sqrt{\frac{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\delta I_k^2 + \delta Q_k^2)}{S_{max}^2}} \cdot 100 [\%] \quad (20)$$

kde

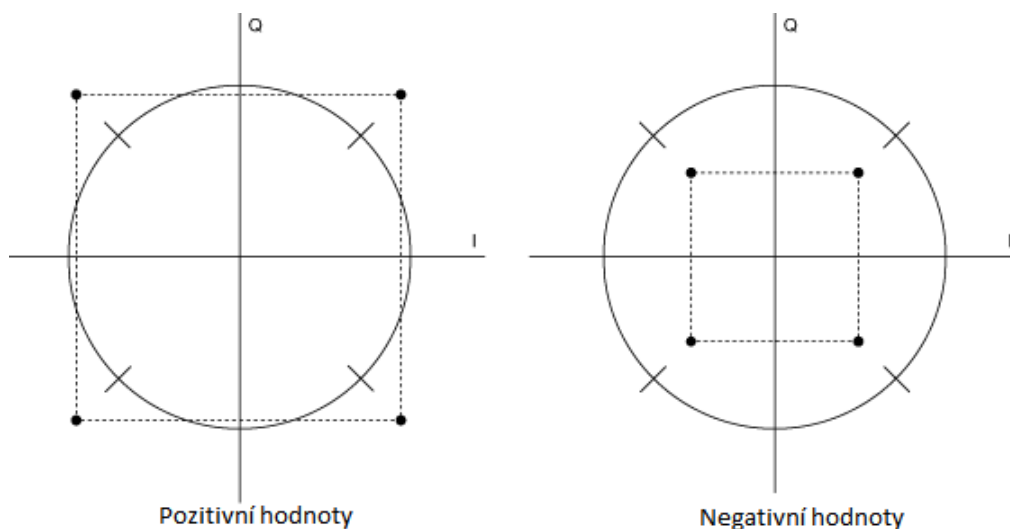
δI_k je I chybovou částí k-tého přijatého symbolu

δQ_k je Q chybovou částí k-tého přijatého symbolu

S_{MAX} je amplituda vektoru v konstelaci

2.3.3 Chyba amplitudy

Představuje rozdíl mezi ideální velikostí amplitudy a velikostí amplitudy přijímaného I/Q signálu, vztaženo k pozici symbolů v konstelačním diagramu. Naměřená hodnota může být pozitivní nebo negativní, indikující zesílení nebo útlum amplitudy signálu. Jednotkou měření je dB, ale v praxi se v měřicích přístrojích používá procentuelní reprezentace hodnoty vzhledem k ideálnímu signálu.



Obrázek 10: Chyba amplitudy

2.3.4 Modulační chyba

MER je definována jako poměr součtu čtverců amplitud ideálních symbolových vektorů k součtu čtverců amplitud chybových symbolových vektorů- obrázek 9.

$$MER = 20 \log \left\{ \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^N (I_k^2 + Q_k^2)}}{\sqrt{\sum_{k=1}^N (\delta I_k^2 + \delta Q_k^2)}} \right\} \quad [\text{dB}] \quad (21)$$

kde

I_k je I částí k-tého ideálního symbolu

Q_k je Q částí k-tého ideálního symbolu

δI_k je I chybovou částí k-tého přijatého symbolu

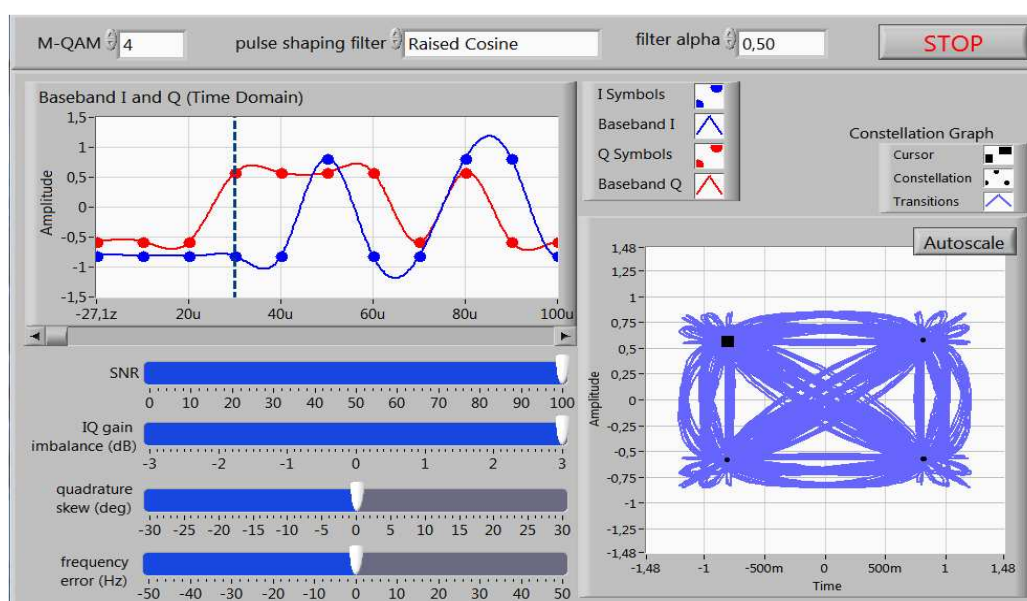
δQ_k je Q chybovou částí k-tého přijatého symbolu

2.3.5 Konstelační diagram

Zobrazuje do I/Q roviny pouze jednotlivé stavy, které jsou výslednicí obou modulačních složek IQ signálu. Lze zjistit rozdíl IQ amplitud, chybu ortogonality, SNR a jiná zhoršení. Na rozdíl od měření EVM, které nabízí jednoduchou číselnou hodnotu, konstelační diagram poskytuje grafickou reprezentaci chyby. V obrázku 11, jsou symboly zobrazeny jako černé body a přechody mezi nimi prezentuje modrá kružnice.

2.3.6 Rozdíl amplitud

Rozdíl amplitud I a Q složky signálu. Způsobuje posun bodů symbolu v konstelačním diagramu do jeho středu. Posun v horizontální rovině je zapříčiněn menší I amplitudou než amplituda Q, posun ve vertikální rovině je zapříčiněn menší amplitudou Q než I. Nerovnováha zisku může být problémem v systémech pracujících s přímou upkonverzí RF. Na obrázku 11 je nerovnováha + 3 dB, což značí posun složky Q ve vertikální rovině.



Obrázek 11: Rozdíl amplitud I a Q části signálu

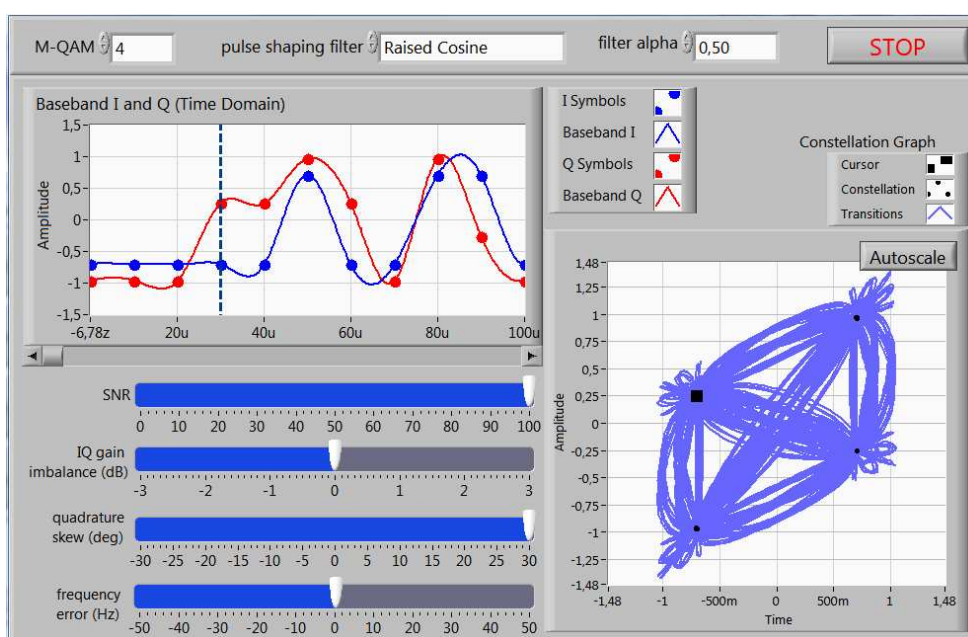
2.3.7 Bílý Gaussův šum

Představuje náhodný signál, ve kterém jsou jednotlivé kmitočtové složky rovnoměrně zastoupeny s gaussovským rozložením (zkratka je AWGN- Additive White Gaussian Noise).

AWGN se přičítá k signálu, má konstantní spektrální výkonovou hustotu a normální rozložení amplitudy. Má vliv na polohu, velikost fázoru a způsobuje rozkmit symbolů od ideální polohy.

2.3.8 Chyba ortogonalita

Chybu ortogonalita (Quadrature skew), způsobuje nepřesný fázový posun mezi I a Q složkou signálu. Za vznik chyby je zodpovědná nepřesná kvadrurní fáze místního oscilátoru (dále jen LO). V ideálním systému je rozdíl mezi vstupující a kvadrurní fází LO přesně 90 °. Nepatrné odchylky od ideální hodnoty mohou ovlivnit fázi a amplitudu demodulovaného základního pásma.



Obrázek 12: Chyba fázového posunu mezi I a Q složkou

2.3.9 Bitová chybovost

Zkráceně BER je pravděpodobnost chybně přenesených bitů v přenosovém řetězci. Měření bitové chybovosti je jedním z nejběžnějších kvantitativních vyhodnocení výkonu přijímače. Bitová chybovost je v digitálních komunikacích definována takto:

$$BER = \frac{\text{počet chybně přijatých bitů za definovaný čas}}{\text{počet celkově přijatých bitů za definovaný čas}} \quad (22)$$

Doba potřebná k měření BER, může být definována počtem hodinových impulzů nebo dobou do výskytu potřebného množství chyb. Teoreticky lze chybovost spočítat jako poměr P_e funkce f :

$$P_e = f\left(\frac{E_b}{N_0}\right) \quad [\text{dB}] \quad (23)$$

kde

E_b je střední energie modulovaného signálu na jeden bit

N_o je spektrální výkonová hustota šumu na jeden Hertz

2.3.10 ρ

ρ (čti ró) je měření hodnotící kvalitu modulace. Vypočtená hodnota ρ je korelací mezi přijímaným a ideálním signálem. Vztah mezi ρ a EVM je následující: EVM měří vektorový rozdíl mezi měřeným a ideálním signálem, ρ měří korelaci mezi těmito signály. Korelací dvou signálů se rozumí jejich tvarová podobnost. Vzorec pro výpočet korelace diskrétních signálů:

$$\rho = (f^\circ g) = \sum_m f * [m] \cdot g[n + m] = \sum_m f * [m - n] \cdot g[m] \quad (24)$$

kde

* - komplexní sdružení

$^\circ$ - korelace

f – signál 1

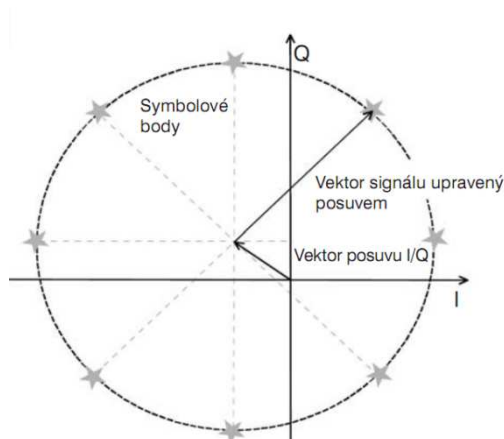
g – signál 2

Korelace ρ dvou signálů může nabývat hodnot od 0 do 1. Pokud je $\rho = 0$ signály nejsou mezi sebou korelovány (jejich tvar není podobný), když $\rho = 1$ jsou tvarově perfektně shodné.

2.3.11 Posuv počátku

Značí posuv osy I/Q v konstelačním diagramu, obrázek 13. Jednotkou posuvu (origin offset) je dB, a vyjadřuje logaritmický poměr vektoru posuvu I/Q (odhadnutý posuv stejnosměrné složky měřeného signálu) k vektoru středního signálu s upraveným posuvem.

$$\text{Posuv počátku} = 20 \log \frac{|\text{Vektor posuvu I/Q}|}{|\text{Vektor signálu s upraveným posuvem}|} \quad [\text{dB}] \quad (25)$$



Obrázek 13: Posuv počátku

3 Prostředky pro generování a analýzu signálu bezdrátově přenášených signálů

Přístroje, pro ověřování parametrů přenosových zařízení pracujících s digitálně modulovanými signály, lze rozdělit na generátory a analyzátory. Generátorem ověřujeme a zjišťujeme, zda přijímač nebo některá z jeho částí správně vyhodnocuje přijímaný signál generovaný generátorem - např. GPS přijímač. Analyzátozem ověřujeme kvalitu signálu generovaného vysílací částí přenosového zařízení, například mobilního telefonu. Měřicí přístroje lze z hlediska flexibility, kterou je potřeba chápat jako schopnost uspokojit potřeby koncového uživatele, rozdělit na:

1. Klasické
2. Externí moduly
3. Virtuální

Klasický přístroj má své funkce pevně stanoveny již z výroby, a lze je jen velmi těžko měnit. Takovýto přístroj má účel vázaný na strukturu jeho funkcí. Hardwarová platforma uvnitř přístroje zpravidla nejde rozšířit, pouze lze měnit v omezeném rozsahu firmware, který tvoří část programového vybavení přístroje. Jeho modifikací lze dosáhnout dílčích změn, například lze ovlivnit přesnost, opravit nedostatky, ale nové možnosti využití (ve smyslu funkce) přístroje nepřinese. Nejčastější využití takovýchto přístrojů bývá v laboratořích.

Pro měření v terénu je zapotřebí mobilní zařízení, které ve spojení s notebookem (např. jako externí modul připojitelný k rozhraní notebooku), nebo i bez něj, umožňuje měření různých parametrů signálu bez nutnosti trvalého síťového napájení. Hlavním požadavkem na tyto přístroje jsou malé rozměry a nízká spotřeba elektrické energie při provozu z baterií.

Virtuální přístroj je univerzální hardware, kde funkčnost měřicího systému tvoří software, jenž lze na míru přizpůsobit konkrétním požadavkům jeho uživatele, a to nejen v době jeho pořízení, ale i v průběhu jeho života. Uživatel má možnost změny fyzické nebo softwarové části přístroje. Může přidávat nové měřicí funkce, měnit grafické prostředí a způsob práce naměřenými daty- různé výpočty naměřených veličin a takto pružně reagovat na nové normy, požadavky trhu. Ve velké míře se využívají v laboratořích, výrobních linkách a velikostně jsou srovnatelné s klasickými přístroji. Podrobnější informace v kapitole 4.2

3.1 Generátory signálu

Jsou to zdroje střídavého periodického signálu (napětí). Tvar, průběh signálu lze měnit v závislosti na požadavcích uživatele. Nejmenší zkreslení nabízí generátory s RC oscilátorem nebo číslicově-analogovým převodníkem. Základními požadavky kladenými na generátory jsou:

1. Spektrální čistota
 - a. Generovaný signál obsahuje jen ty harmonické (sinusové) frekvence, které odpovídají požadavkům na generovaný signál, pro dosažení vysoké spektrální čistoty sinusového průběhu je stále nejvhodnější RC oscilátor - užívá se v tónových a některých signálových generátorech
2. Frekvenční stálost a přesnost:
 - a. Užívají se krystalem řízené oscilátory nebo frekvenční syntetizéry
 - b. Frekvenční stálost se obvykle udává za dobu 24 hod. a 1 rok
3. Velikost frekvenčního rozsahu
 - a. Typický nejméně 4 řády, u funkčních generátorů podstatně větší (např. 1 mHz až 10 MHz)
 - b. Dosahuje se přepínáním ladicích součástek (u syntetizérů dělením frekvence)
 - c. Pro velký rozsah v každé poloze se dříve používaly záznejtové generátory (směšování dvou frekvencí)
4. Definované a přesné výstupní napětí
 - a. Požadavek na výstupní napětí a impedanci realizuje výkonový zesilovač a výstupní dělič
 - b. Udávané výstupní napětí platí jen při dodržení předepsané zatěžovací impedance
5. Definovatelná výstupní impedance - 50, 300, 600, 120 Ω , nebo plynule měnitelná
6. Možnost volby různých průběhů signálů- sinus, obdélník, trojúhelník, bílý šum a jiné
7. Malé vyzařování generátoru- kvalitní stínění

3.1.1 Vysokofrekvenční generátory

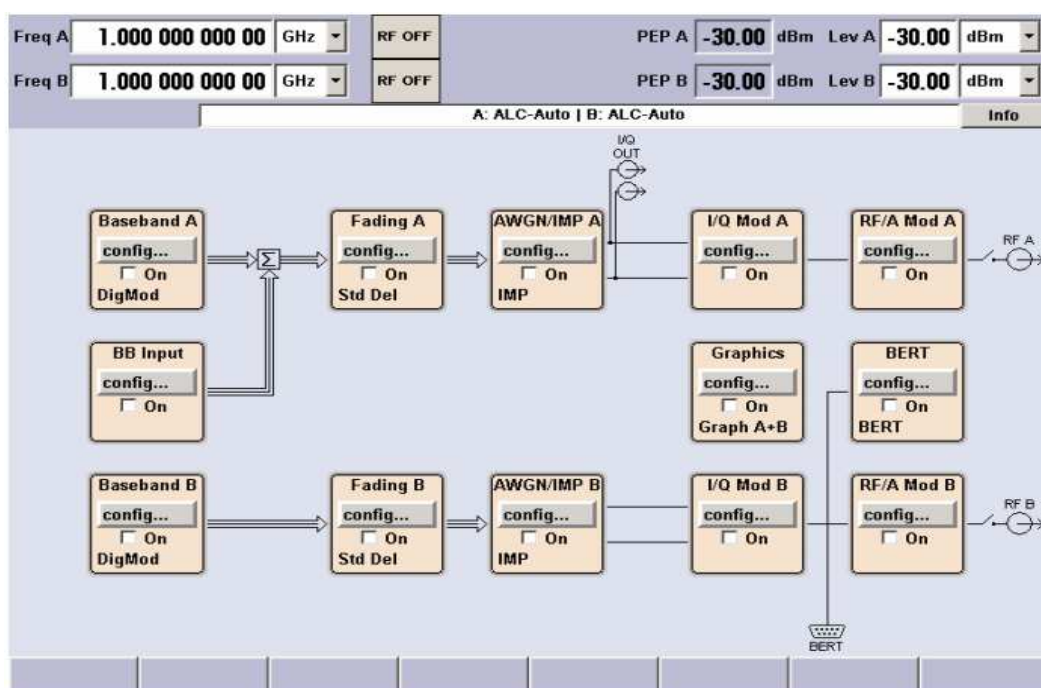
Generátory využívané především pro výrobu, měření, zkoušení a údržbu VF zařízení. Běžně se nazývají signální. Umožňují generovat různé druhy modulací, od frekvenční po kvadraturní. Kmitočtové rozsahy generovaných signálů jsou různé, od desítek kHz po GHz (např. Rohde&Schwarz SMU 200A 100kHz až 3GHz).

Uživatelské prostředí moderních generátorů (pro zbytek této kapitoly R&S SMU 200A) je tvořeno operačním systémem, ve kterém je spuštěna speciální aplikace k ovládání přístroje. Generátor je možné ovládat počítačovými vstupními periferiemi, jakou je myš a klávesnice, nebo využít klasická tlačítka na čelním panelu přístroje. Předdefinovaná nabídka modulací

signálu, přenosových standardů je ve formě knihoven funkcí. Grafické prostředí se skládá z blokového diagramu, kterým určíme vlastnosti generovaného signálu:

1. Blok generování signálu v základním frekvenčním pásmu, klíčování signálu (QPSK, QAM, EDGE a jiné), volba filtru, symbolová rychlost, kódování dat
2. Blok k simulaci kolísání nebo úniku signálů z kanálu A do kanálu B a opačně
3. Blok degradací signálu-složky generovaného signálu lze záměrně degradovat a ovlivňovat jinými signály. Možností, který kvalitativní parametr degradací ovlivnit je velké množství- např. nastavení SNR
4. Blok modulace I/Q signálu na nosný kmitočet
5. Blok vysílací části generátoru

Bloky jsou zobrazeny na obrázku 14. Jednotlivé funkce/bloky se aktivují zatrhnutím políčka On, pokud jsou aktivní, probarví se modrou barvou. Nastavené parametry jsou zobrazeny ve spodní části jednotlivých bloků. Základní nastavení referenční úrovně a vysílacího kmitočtu je přehledně zobrazeno v horní části obrazovky. Nastavené konfigurace lze uložit pro pozdější opakované použití, a lze si takto vytvořit různé šablony pro měření. Generátor (R&S SMU 200A) je objemné zařízení, vyžadující síťové napájení, což jej předurčuje k použití v laboratoři.



Obrázek 14: Uživatelské prostředí generátoru

3.2 Analyzátoři signálu

Přístroje pro analýzu elektromagnetického signálu s různými průběhy. Měření se dělí na dvě základní oblasti:

1. Časová- osciloskopická měření
2. Frekvenční- měření spektra a komplexní roviny

3.2.1 Osciloskopická měření

Osciloskop je přístroj, umožňující sledovat napětíové průběhy signálů v závislosti na čase. S vhodným převodníkem lze měřit jakýkoliv jev- zvuk, tlak, světlo a jiné. V zobrazeném grafu obvykle svislá osa (y) představuje napětí a vodorovná osa (x) představuje čas. Můžeme je rozdělit do tří základních skupin: analogové, paměťové digitální a vzorkovací. Všechny osciloskopy obsahují základní obvody:

1. Vstupní obvody- slouží k připojení měřeného signálu, volba vstupního odporu
2. Spouštěcí obvody- synchronizace a spuštění časové základny
3. Vstupní zesilovače- zesílení signálu, určují šířku pásma osciloskopu
4. Časová základna- generuje časové měřítko na horizontální ose obrazovky
5. Zpožďovací obvody- umožňují zpoždit rozběh časové základny tak, aby bylo možno pozorovat signál od počátku

Moderní (digitální) osciloskop nahradí v laboratoři celou řadu jednoúčelových přístrojů.

3.2.2 Digitální osciloskop

Vstupní signál je vzorkován analogově-digitálním převodníkem a v podobě navzorkovaných bodů uložen do paměti. Takto zpracované body tvoří záznam signálu. Spouštěcí obvody určují první a poslední bod záznamu, který je ukládán do paměti přístroje. Po konečném uložení všech vzorků jsou zobrazeny na displeji přístroje. Digitálně zpracovanou informaci lze uchovat pro pozdější prohlížení a tisk. Výkon digitálních osciloskopů je dán vzorkovací frekvencí. Současné přístroje mají tuto frekvenci v řádech GS/s (S= sample, neboli vzorek). Tato frekvence v zásadě ovlivňuje časovou délku záznamu s ohledem na velikost záznamové paměti. Lze ji vyjádřit:

$$f_s = \frac{N_{MEM}}{T_{REC}} \quad [S/s] \quad (26)$$

kde

f_s je maximální vzorkovací frekvence [S/s]

N_{MEM} je počet vzorků které se vejdou do paměti

T_{REC} délka zaznamenaného časového intervalu [s].

Je-li rychlost časové základny 1ms/dílek (tedy 10ms při 10 dílcích) a velikost paměti 1000 vzorků, pak maximální vzorkovací frekvence, kterou může osciloskop použít je $1000/0,001 = 100 \text{ kS/s}$.

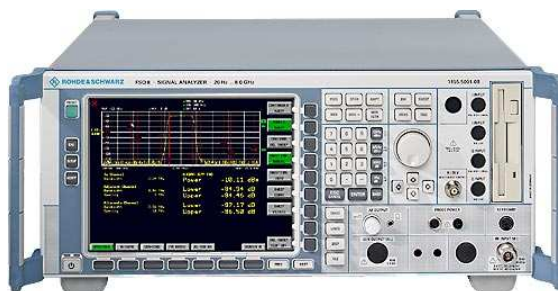
3.2.3 Spektrální měření

Slouží k vyhodnocení signálů ve frekvenční doméně. Spektrální a signálové analyzátory tvoří skupinu přístrojů, které z velké části řeší otázku měření v digitálních a analogových komunikačních systémech. Spektrální analyzátory měří důležité parametry analogových modulací, jakými jsou například frekvence a fáze signálu. Signálové (vektorové) analyzátory umožňují navíc měření modulačních parametrů ortogonálních modulací, vektorové a konstelační diagramy. Spektrální a signálové analyzátory se dělí do dvou skupin. První skupinu tvoří rozmítané analyzátory (heterodynní analyzátory) a druhou analyzátory FFT, pracující na principu diskrétní Fourierovy transformace.

3.2.4 Signálový analyzátor

Přístroj k měření parametrů signálů. Nejčastějšími měřicími úlohami jsou měření kmitočtu, úrovně a degradace signálu. Standardně je osazen obvody pro zpracování ortogonálních modulací. Uživatelské prostředí moderních signálových analyzátorů je tvořeno operačním systémem, ve kterém je spuštěna speciální aplikace k ovládání přístroje. Analyzátor je možné ovládat počítačovými vstupními perifériemi, jakou jsou myš a klávesnice, nebo lze využít klasická tlačítka na čelním panelu přístroje.

Před začátkem každého měření je potřeba analyzátor správně nastavit pro očekávané parametry přijímaného signálu- nejdůležitějšími parametry přijímaného signálu jsou nosný kmitočet, omezení kmitočtového rozpětí, referenční úroveň, šířka pásma signálu a filtrů, použité modulační schéma (např. 16QAM, možnost volby z knihovny). Pro správné dekodování informace z přijatého signálu je zapotřebí znát použité kanálové, zdrojové kódování. Naměřená data, respektive jejich hodnoty je možno uložit do paměti přístroje nebo vytisknout.



Obrázek 15: Signálový analyzátor Rohde&Schwarz FSQ8

3.3 Externí moduly připojitelné k počítači

Tvoří zajímavou alternativu ke klasickým přístrojům. Výhodou je mobilita, malé rozměry zařízení a možnost pracovat bez síťového elektrického napájení. Tester je tvořen třemi základními součástmi:

1. Přenosný počítač (notebook)
2. Software- operační, měřicí
3. Externí modul- zařízení připojené pomocí sběrnice USB k NB, sloužící ke sběru dat

Podobně jako u virtuálních přístrojů senzor pouze snímá data a přeposílá je k dalšímu zpracování do NB. Vyhodnocení dat probíhá speciálním měřicím softwarem spuštěným v operačním prostředí (Windows nebo Unix). Příkladem takového přenosného testeru je platforma Power Viewer Plus s příslušnými senzory- např. NRP Z81 od firmy Rohde&Schwarz, obrázek 16.

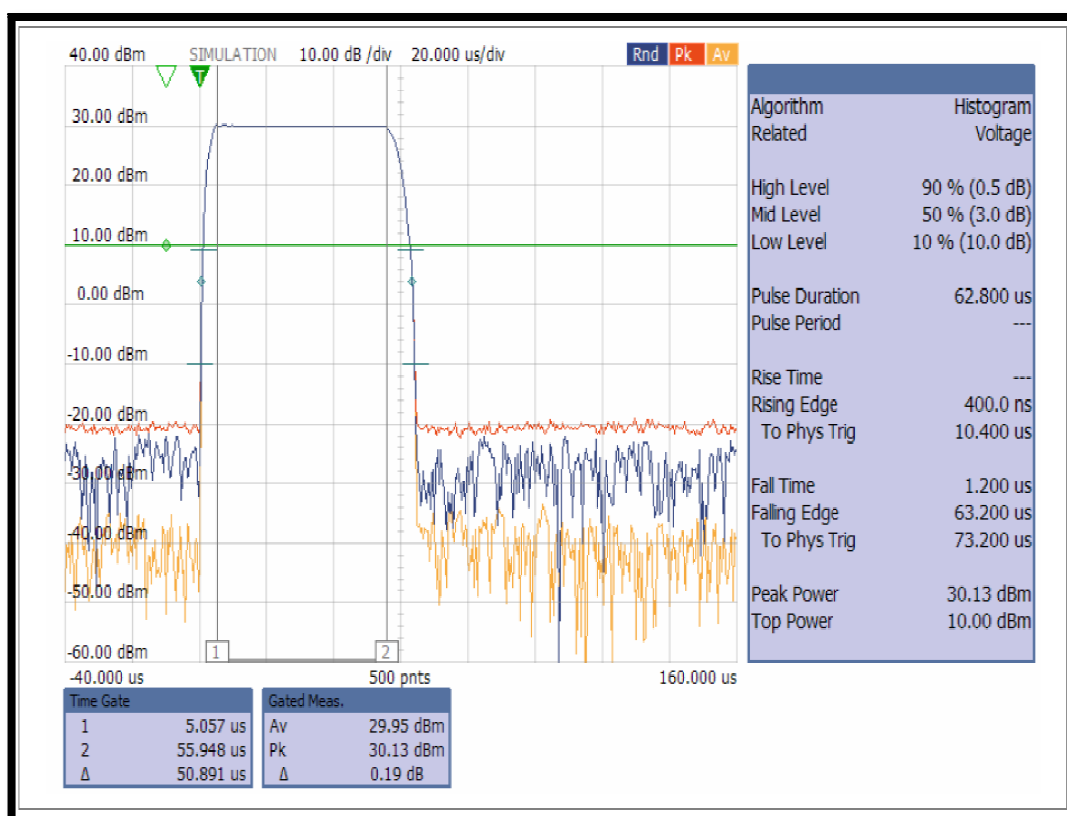


Obrázek 16: Měřicí platforma R&S Power Viewer Plus

Tato měřicí platforma umožňuje měření výkonu signálů- průměrný, špičkový výkon, šířku pulzu a časové sloty (GSM) s možností vykreslení naměřených hodnot do grafů (lze zvolit z několika nadefinovaných křivek CCDF, CDF a PDF). Měřicí proces se skládá z několika kroků:

1. Spuštění měřicího softwaru
2. Kalibrace senzorů
 - a. Nulovací sekvence- vyžaduje odpojení signálu od senzorů

- b. Vyčtení informací o připojeném senzoru a zobrazení v měřícím softwaru
- c. Spuštění zkušebního testu senzoru- tzv. self test provede zabudovaný test senzoru a výsledek úspěšnosti testu předá měřicímu softwaru v NB
3. Výběr měřící metody, spuštění měření
4. Zastavení měřícího procesu
5. Uložení, vytisknutí naměřených hodnot

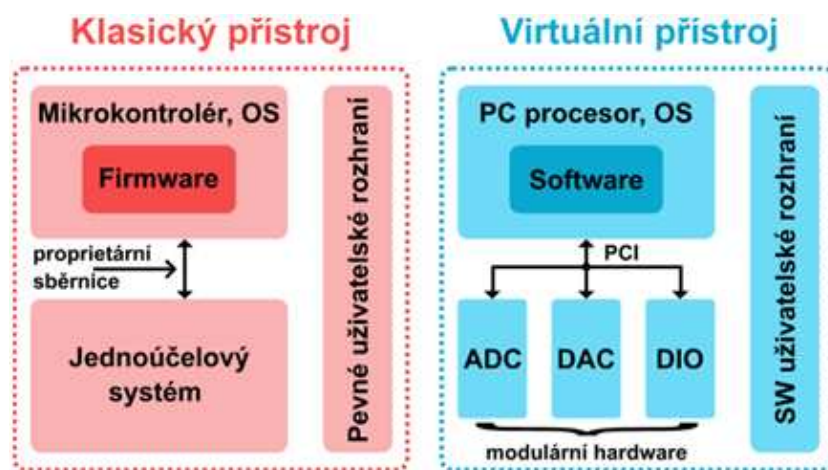


Obrázek 17: Histogram výkonové spektra signálu programu Power Viewer Plus

4 Návrh a ověření systému přenosu dat

V současné době se v moderních přenosových systémech čím dál více využívá bezdrátová komunikace. Neustálý vývoj nových technologií přináší velké množství přenosových standardů a komunikačních přístrojů. Všechny nové standardy pracují s daty a informacemi v digitální podobě. Každý přenosový systém je realizován zařízením, které má svou funkci jednou provždy pevně danou a lze ji jen stěží změnit. Fungování přístrojů, například mobilní telefon GSM, můžeme do jisté míry ovlivnit změnou firmwaru nebo SIM karty, ale jen stěží jej změníme na přístroj pracující v síti 3G.

Tuto situaci lze změnit využitím koncepce nazvané SDR- softwarové rádio. Základem této koncepce je myšlenka, že hardware přístroje je univerzálně koncipovaný a funkce přístroje jsou řešeny zejména softwarem, který lze pružně změnit podle potřeby uživatele a přejít tak na principiálně jiný typ funkcí přístroje. Stejný princip lze aplikovat na systém, který má přenášet data. Lze takto snadno generovat a přijímat signály různých přenosových systémů, aniž by k tomu byla zapotřebí spousta speciálních jednoúčelových přístrojů. Takovéto přístroje se označují jako virtuální- přístroj je tvořen zejména softwarovou částí. Vysílač (přijímač) neobsahuje fyzicky žádné hardwarové demodulátory, drahé filtry a podobně, všechny tyto součástky supluje software. Rozdíl mezi klasickými a virtuálními přístroji je na obrázku 18. Na tomto principu jsem navrhnul a realizoval systém přenosu dat v rámci své diplomové práce.

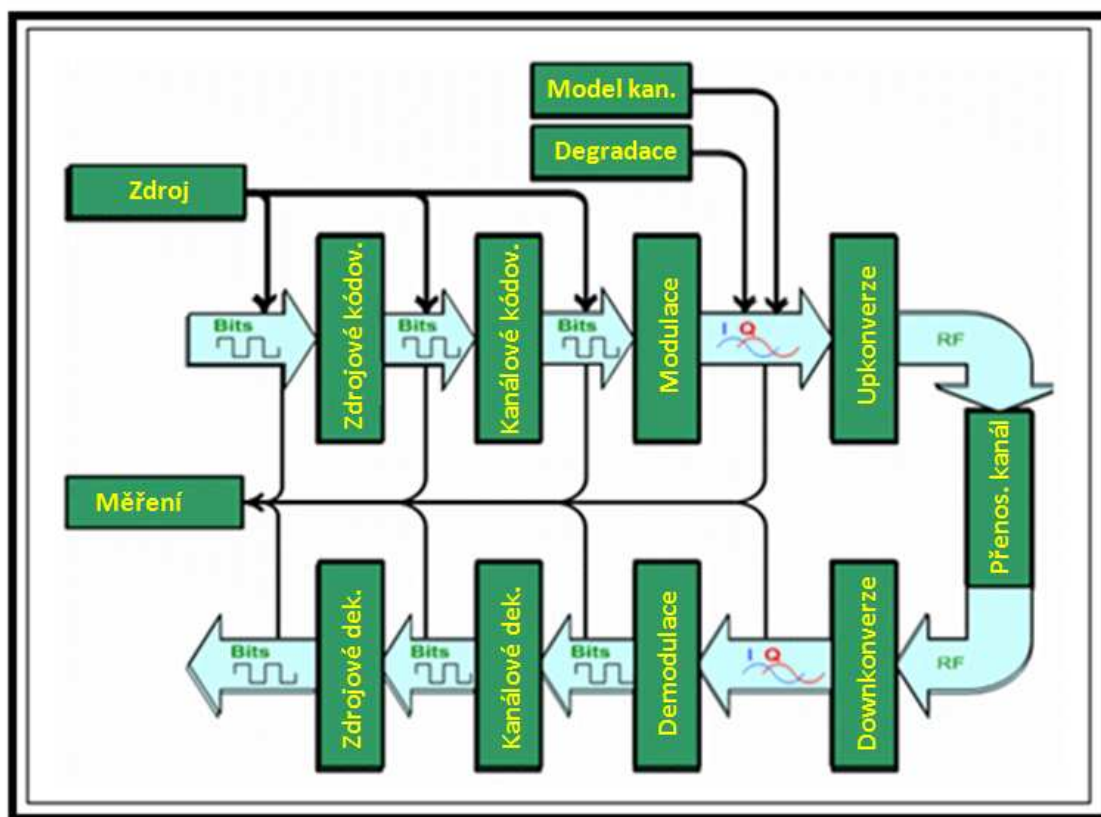


Obrázek 18: Srovnání klasického a virtuálního přístroje

4.1 Přenosový řetězec

Vytvoření funkčního přenosového systému předchází pochopení toho, co se uvnitř moderních přenosových systémů se signálem děje. Data, přenášená od jednoho uživatele k druhému, musí projít přenosovým řetězcem skládajícím se z několika důležitých základních bloků- obrázek 19.

Detaily funkce jednotlivých bloků se pro různé přenosové systémy mění, avšak princip zůstává stejný.



Obrázek 19: Blokové schéma digitálního přenosového řetězce, zdroj[7]

4.1.1 Zdrojové kódování

Zbavuje data redundance (nadbytečných dat pro přenos) pomocí vhodných algoritmů, filtrů a kódů. Nejčastějšími nástroji jsou komprese, symbolika, zkracování nebo vzorkování s proměnou rychlostí a jiné. Bezeztrátová komprese využívá opakování stejných prvků v kódu, které jsou nahrazovány určitými „symboly“, přičemž neovlivňuje obsah – obraz, zvuk či data. Ztrátová komprese pak využívá nedokonalosti lidských smyslů a „vypouští“ informaci, kterou není lidské oko nebo ucho schopno zaznamenat. Opakem zdrojového kódování je zdrojové dekódování.

4.1.2 Kanálové kódování

Cílem kanálového kódování je zabezpečit signál proti chybám vznikajícím při přenosu v komunikačním kanálu. Chyby signálu mohou být způsobeny šumem, různými druhy rušení, únikem signálu, odrazy, přepnutím signálu při handoveru, a jiné. Mohou být ojedinělé nebo se vyskytovat ve skupinách (shluky chyb, bursty). Podstatou zabezpečení signálu je úmyslné a

kontrolované zvýšení jeho redundance (např. přidáním počtu kontrolních bitů). To se projeví zvýšením přenosové rychlosti signálu a tím i nutné šířky kmitočtového pásma kanálu, při výrazném snížení chybovosti signálu BER. V praxi je přenosová rychlost omezená, kanálové kódování tedy snižuje objem přenášené informace za jednotku času. Kódování je realizováno bezpečnostními kódy umožňující detekovat chybu, a v některých případech ji opravit (záleží na typu kódu). Příkladem lze uvést CRC, konvoluční nebo Hammingovy kódy. Opakem kanálového kódování je kanálové dekódování.

4.1.3 Modulace

Proces, kterým se mění původní charakter přenášené informace na tvar vhodný pro přenos podle požadované kvality a principu přenosového systému. Podrobnější informace v kapitole 2.2.1.

4.1.4 Upkonverze

Vysílání dat na frekvenci dle zvolené přenosové technologie, například u ZigBee je to 2,4 GHz. Opakem je downkonverze pro příjem signálu.

4.1.5 Přenosový kanál

Souhrn prostředků, které vytvářejí cestu pro přenos informací mezi uživateli. Prostředky jsou přenosová média (např. metalické, optické vodiče) a technické prvky, které kanál spoluvytvářejí- opakovač, zesilovače a jiné. Kanál je charakterizován šířkou pásma, přenosovou rychlostí, úrovní šumu, chybovostí a jině.

4.2 Návrh systému pro bezdrátový přenos dat

Pro potřeby diplomové práce jsem systém bezdrátového přenosu dat realizoval prvky na bázi virtuální instrumentace. Hardwarovou podobu virtuálního přístroje lze realizovat jako součást osobního PC nebo pomocí speciálního modulárního systému PXI. Každá takováto platforma se skládá z několika částí:

1. PC nebo PXI skříň s kontrolérem
2. HW moduly- A/D, D/A převodníky, směšovače
3. Software- operační systém, vývojové prostředí

Podstata virtuálního přístroje spočívá v rozšíření otevřené architektury PC nebo PXI skříně o to, co mu chybí k realizaci měřících nebo řídicích procesů. Pro navrhovaný přenosový systém jsou to hardwarové moduly pro směšování, generování a analýzu signálu, které pracují s tzv. surovými daty. Surová data jsou pak softwarem virtuálního přístroje dotvářena filtrací, modulací

a kódováním do konečné podoby pro tvar vhodný pro přenosový systém. Software je tedy klíčovou částí mnou navrhovaného přenosového systému

4.3 Hardwarová část systému přenosu dat

Je tvořena hardwarovými moduly, které slouží k měření či generování signálu počítačem. Moduly umožňují zapojení osobního, průmyslového počítače přímo do měřícího procesu a spolu s vhodným programem jej mohou přeměnit na různé přístroje. Funkce modulů se dělí na:

1. Analogové vstupy a výstupy
2. Digitální vstupy a výstupy
3. Čítače
4. Časovače
5. Generátory
6. Analyzátory

Za hardwarový modul můžeme považovat i hardware obsahující současně více funkcí. Dalším důležitým prvkem pro orientaci v modulech je jejich komunikační sběrnice s přístrojem:

1. Interní
 - a) PCI, PCIE-E(standardní karty pro PC)
 - b) ISA- zastaralá sběrnice, v současnosti používaná jen v průmyslových aplikacích
 - c) Průmyslové systémy VXI a PXI
2. Externí
 - a) USB
 - b) FireWire
3. Speciální pro přenosné přístroje
 - a) Sběrnice PCMCIA (notebook)
 - b) SD, Compact Flash (PDA)

Základní parametry modulů:

1. Rozlišení A/D převodníků (12, 16 bit)
2. Maximální vzorkovací frekvence
3. Napětový, proudový rozsah
4. Šum
5. Počet a možnosti přepínání vstupů
6. Existence spouštěcích vstupů/ výstupů pro synchronizaci
7. Použité sběrnice
8. Kompatibilita s výrobcí softwaru

4.3.1 PXI platforma

Pro navrhovaný přenosový systém jsem si vybral moduly PXI (PCI eXtensions for Instrumentation), což je platforma založená na standardu PC pro měřicí a automatizační systémy. PXI kombinuje parametry a vlastnosti klasické sběrnice PCI s modulárním Eurocard mechanickým provedením tzv. Compact PCI a přidává specializované synchronizační sběrnice. Spolu se softwarem vytváří vysoce výkonnou a přitom finančně nenáročnou platformu pro automatizaci, regulaci a měření v takových oblastech jakými jsou testovací linky, vojenský a letecký průmysl, systémy monitorování, automobilový průmysl a průmyslové řízení. Standard PXI pro programovatelné automaty byl vyvinut v roce 1997 a od roku 1998 je možné se s ním setkat v reálných aplikacích. PXI průmyslový standard je zastřešován organizací PXISA (PXI Systems Alliance).



Obrázek 20: PXI platforma

Hardwarová architektura PXI je složena z těchto tří hlavních komponent:

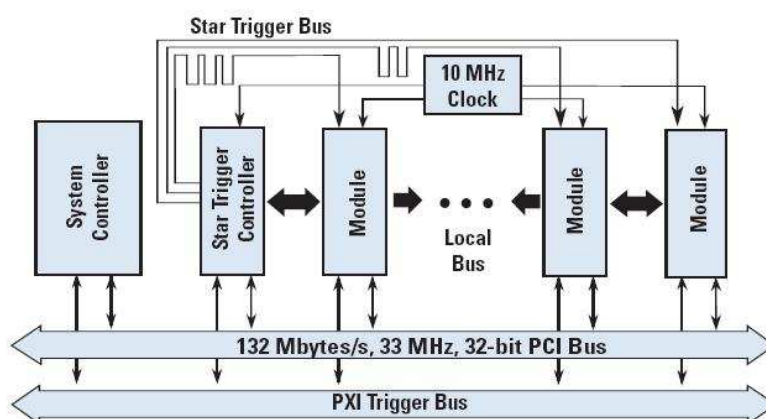
1. skříň
2. systémový kontrolér
3. periferní moduly

Variabilní modulární uspořádání komponent v podobě zásuvných modulu nabízí libovolné vytvoření a přizpůsobení PXI systému pro konkrétní aplikaci. Se změnou měřeného objektu lze pružně změnit i měřicí pracoviště jednoduchou výměnou některých modulů ve skříni za jiné, bez jakékoliv změny ostatního vybavení. Jeden systém PXI snadno nahradí skupinu přístrojů (např. osciloskop, multimetr, generátor).

4.3.2 PXI skříň

Základem systému PXI/CompactPCI je skříň, která tvoří pevnou strukturu pro vkládané moduly (karty) a zároveň zajišťuje jejich vzájemné propojení, komunikaci a napájení. Mechanická část je tvořena rámovou strukturou různých velikostí záležící na počtu karet a požadovaných funkcí.

Velikost rámu je dimenzovaná dle standardu velikosti modulu PXI a CompactPCI mnoha výrobců. Elektrickou část tvoří propojující podstavce, tzv. PXI backplane, který obsahuje sloty pro připojení modulu. Všechny sloty jsou vzájemně propojeny sběrnicemi. PXI backplane obsahuje současnou klasickou PCI sběrnici, jak ji známe z dnešních PC, s dalšími sběrnicemi pro přesné časování a synchronizaci (timing bus, triggering bus). Některé skříně již obsahují integrovaný DC zdroj s běžným PC napětovým výstupem (+3.3V, +5.0V, +12V a -12V) a nucené chlazení vzduchem.



Obrázek 21:Sběrnice PXI skříně, zdroj [7]

4.3.3 PXI systémový kontrolér

Tento modul, obvykle osazen ve skříní nejvíce vlevo, umožňuje řízení systému PXI přes standardní PC (nebo jeho ekvivalent). Obecně lze tyto moduly rozdělit do dvou bloků:

1. PXI Remote Control (Vzdálené řízení systému PXI) - řízení prostřednictvím přímo připojeného blízkého PC nebo prostřednictvím PC v síti Ethernet (spojení zprostředkovává k tomu určený PXI modul).
2. PXI Embedded Control (řízení přímo vestavnými moduly v PXI systému) - vestavné moduly jsou obvykle složeny z komponent běžných v PC (CPU, RAM, pevný disk, USB, LPT, RS-232, RS-485).

4.3.4 PXI periferní moduly

Tuto oblast tvoří mnoho periferních modulů pro veškeré současné rozšířené komunikační standardy, rozhraní, vstupy a výstupy, diagnostiku. PXI podporuje standardy pro komunikaci s PC a ostatními PLC (Gigabit Ethernet, Ultra2 SCSI, GPIB, VXI a VME (MXI-2 a MXI-3), CardBus, PCMCIA), se senzory, snímací, měřící a další technikou (RS-232, RS-485/RS-422, CAN). Softwarová podpora systému PXI je založena na standardu softwaru pro PC firmy

Microsoft, konkrétně Microsoft Windows operační systém a tím minimalizuje náklady na nákup speciálních softwaru. Kontroléry tedy využívají všechny standardy Windows, včetně aplikačních programových rozhraní LabWindows/CVI, Measurement Studio, Visual Basic a Visual C/C++ nebo LabVIEW od National Instruments. Jako alternativa k OS založených na Windows je zde real-time software pro časově kritické aplikace vyžadující určitou rychlost vykonání programové smyčky a aplikace bez nutnosti použití klávesnice, myši, monitoru.



Obrázek 22: Systémový kontrolér, zdroj [7]

4.3.5 Moduly použité pro přenosový systém

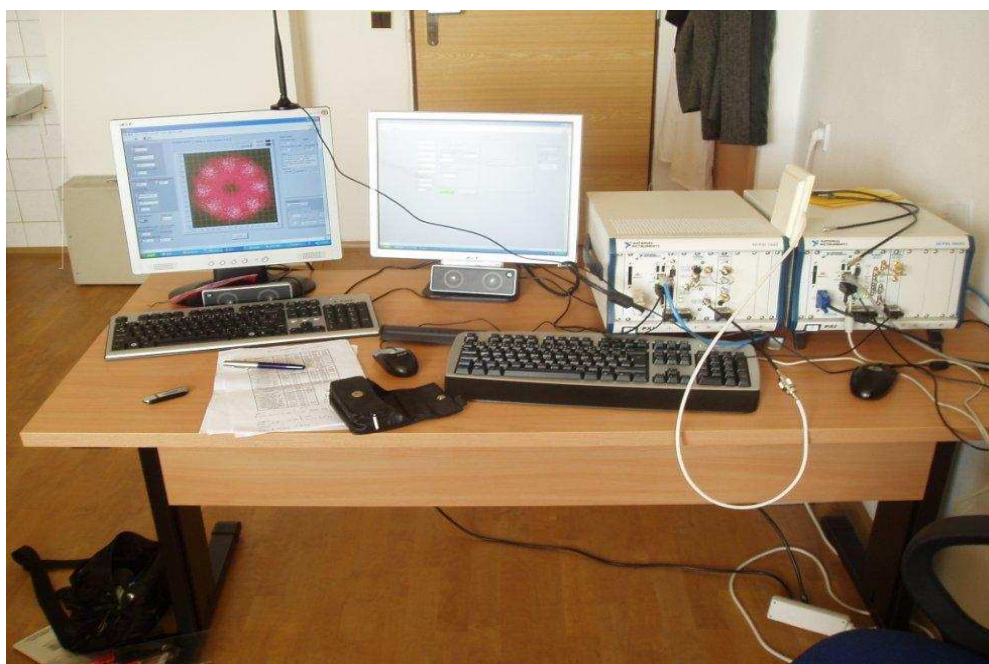
Systém pro přenos dat jsem rozdělil na funkční vysílač a přijímač, který jsem sestavil z modulů PXI platformy. Použité hardwarové a softwarové vybavení systému je od firmy National Instruments[7]. Vysílač je sestaven z:

1. PXI skříň 1042Q
2. PXI systémový kontrolér 8106
3. PXI periferní moduly
 - a) Generátor signálu NI PXI 5421
 - b) Upconverter NI PXI 5610

Příjmač tvoří:

1. PXI skříň 1042
2. PXI systémový kontrolér 8106
3. PXI periferní moduly
 - a) Downconverter NI PXI 5600
 - b) Digitizér NI PXI 5142

Podrobné parametry částí vysílače a přijímače jsou uvedeny v příloze 1.



Obrázek 23: Vysílač a přijímač sestavený z modulů PXI

4.4 Softwarová část systému

Je tvořena vývojovým prostředím LabVIEW od firmy National Instrument, pracující s grafickým programovacím jazykem G. Jednoduchost prostředí spočívá v použití ikon namísto řádků s textem, jako je běžné u klasických vývojových prostředí. Na rozdíl od textových jazyků se používá programování na principu datového toku, který prochází uzly v blokovém schématu a určuje posloupnost prováděných funkcí. Vývojové prostředí je vyvinuto tak, aby ho bylo možno jednoduše integrovat s nejrůznějšími měřicími vstupy, výstupy a zároveň aby poskytovalo vědecké knihovny pro testování, měření či řízení. Vývojové prostředí funguje v PC (nebo PXI) v součinnosti s operačními systémy typu Windows, Linux, MacOS, nebo ve vestavěných systémech a v hradových polích FPGA. Aplikace fungující v prostředí LabVIEW označujeme jako „Virtuální měřicí přístroje“, zkratkou VI. Umožňují kombinovat vizuální program s MathScriptem (Matlab) a exportovat VI ve formě DLL komponent pro použití třetími stranami. VI vytvořený v LabVIEW se skládá ze dvou oken. První z nich tvoří Čelní panel- uživatelské rozhraní, kde jsou zastoupeny ovládací prvky a indikátory. Běžný uživatel používá výhradně toto okno k ovládání přístroje. Každý prvek z Čelního panelu je zastoupen ve formě bloku v druhé části programu- Blokovém schématu, které je zdrojovým kódem aplikace. Toto okno je běžnému uživateli skryto, používá jej pouze programátor přístroje, podobně jako

firmware u klasických přístrojů. Bloky zastupují jednotlivé komponenty a funkce VI, které jsou mezi sebou propojeny „virtuálními vodiči“ přenášející data, je možné je spojovat do uzlů, spojů.

4.5 Virtuální vysílač a přijímač

V následujících bodech bude popsána implementace základních bloků realizujících jednotlivé části přenosového řetězce z kapitoly 4.1. Pro softwarovou část systému jsem použil vývojové prostředí LabVIEW verze 8.6, většina bloků zdrojového kódu je z knihovny addons→modulation→digital a measurement I/O→NI RFSG (NI RFSA). Systém je tvořen:

1. Vysílací částí
2. Přijímací částí

4.5.1 Vysílací část- podprogram generátor signálu

Generuje digitální signál, kterému je přiřazeno zdrojové a kanálové kódování. Takto vytvořený signál je modulován modulací PSK a z ní odvozenými typy. Zdroj dat tvoří blok MT Bit Generation, který generuje sekvence bitů nebo uživatelem definovaná data a to buď ze souboru, nebo libovolně zvoleným vzorem posloupnosti bitů. Na takto generovaná data je možno aplikovat kódování v přepínači Case Structure. Data z bitového generátoru jsou komprimována děrovým kódem – blok Puncture Data Stream, který zrychluje přenos dat podle:

$$R_{OUT} = R_{IN} \cdot \frac{pq}{(pq-L)} \quad (27)$$

kde

R_{IN} vstupní rychlost kódu

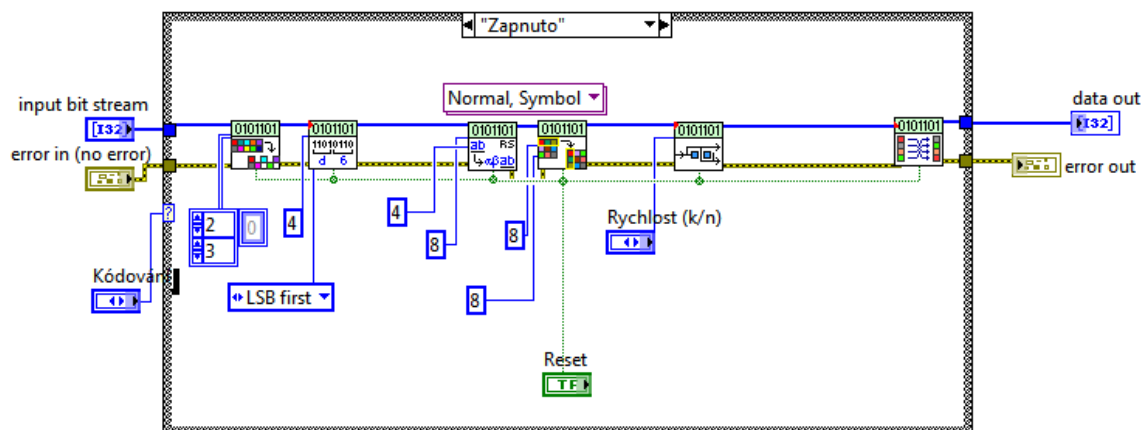
R_{OUT} výstupní kódová rychlost

pq sekvence vstupních dat

L počet odebraných bitových nul ze vstupních dat

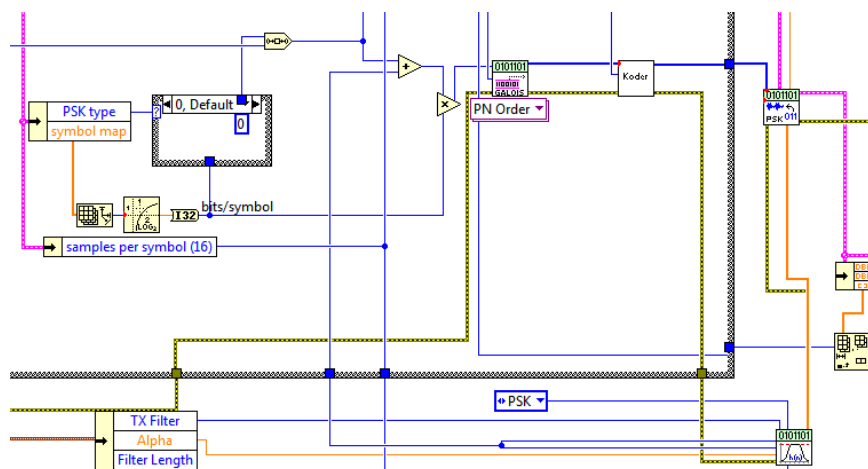
Blok jsem nastavil na rychlost $\frac{3}{4}$ (odebere dvě nuly), kdy do kodéru vstupuje matice 2x3 a vystupuje 1x4, což značí komprimaci vstupních dat o 2 bity podle (27). Tyto data jsou dále zabaleny do symbolů o délce 4 bitů na symbol. Takto jsem realizoval zdrojové kódování. Kanálové kódování tvoří vnitřní a vnější kódování. Vnější protichybové zabezpečení na úrovni symbolů je tvořeno Reed-Solomonovým kódem (8,4), ten přidá každému symbolu 4 korekční bity, což při dekódování umožní opravu až dvou bitů v symbolu. Na výstupní data je aplikováno vnější prokládání bitů blokovým prokladačem. Vnitřní protichybové zabezpečení je provedeno konvolučním kódem s volitelným kódovým poměrem (defaultní hodnota je $\frac{1}{2}$), kódový poměr

lze měnit podle požadavku na přenosovou rychlost, ale zúžení kódu představuje méně robustní protichybové zabezpečení. Na výstup konvulučního kodéru je aplikováno vnitřní prokládání řízenou změnou pozic datových elementů- blok MT Permute. Kódovací proces zachycuje obrázek 24.



Obrázek 24: Kodér

Dalším blokem je modulace těchto dat. Tuto funkci plní blok Modulate PSK, do kterého vstupuje datový tok, který je Grayovým kódem mapován do PSK symbolů. V tomto bloku se definují základní parametry signálu: šířka pásma a použitý filtr šířky pásma, symbolová frekvence, systémové parametry modulace PSK. Běh programu je ohraničen přepínačem Case Structure, který v případě výskytu kritické chyby automaticky přepne program do módu chyby Error Out, chybu zobrazí na čelní panel a program se ukončí. Takto vytvořený funkční generátor signálu jsem uložil jako samostatný virtuální přístroj, abych jej v další části programu mohl vložit jako podprogram.



Obrázek 25: Zdroj signálu

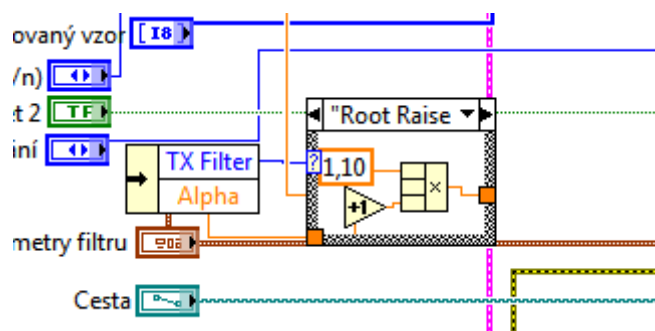
4.5.2 Vysílač

Základ vysílače tvoří bloky ovladačů pro komunikaci s hardwarem NI PXI 5610. Tato část ovládá hardwarovou část přístroje uvedenou v kapitole 4.3.5

1. Blok NI RFSG Initialize, inicializace použitého hardwaru pro měření. Nastavujeme číslo vysílače, jméno digitizéru a čas běhu PLL
2. Blok NI RFSG Configure, konfigurace nosné frekvence a výkonové úrovně signálu
3. Blok NI RFSG Configure IQ, nastavení fyzické části přístroje, která aplikuje ortogonální modulaci na signál- hardware NI PXI 5421
4. Blok NI RFSG Initiate, zapíná fyzické generování signálu
5. Blok NI RFSG Abort, vypíná fyzické generování signálu

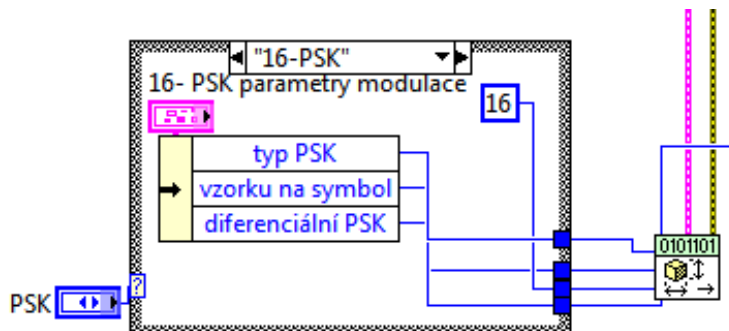
Těmto pěti základním blokům se přiřadí uživatelem definovaná funkce přístroje, v mém případě vysílače digitálního signálu modulovaného modulací PSK. Základ tvoří generátor signálu z kapitoly 4.5.1. Ten jsem do vysílače vložil jako podprogram, který je možno plně ovládat z čelního panelu přístroje. Výstupní signál z tohoto generátoru dále ovlivňují degradace, kterými supluji přenos signálu reálným přenosovým kanálem. Uživatel má možnost aplikace degradace na vysílaný signál, formou bílého šumu, rozdílu amplitud, chyby ortogonality, frekvence a jiných. Čelní panel se skládá z několika částí, které v blokovém digramu tvoří zdrojový kód:

1. Ovladače hardwarové části přístroje
2. Ovládání generátoru, nastavení kódování- část programu, kterou uživatel ovládá podprogram „Generátor“ z čelního panelu. Důležitou částí je filtr, při realizaci jsem vycházel z teoretických znalostí uvedených v kapitole 2.2.2. Je možné zde zvolit filtr Raised Cosine, Root Raised Cosine nebo žádný



Obrázek 26: Realizace filtru

3. Nastavení modulace- přepínač Case Structure rozděluje nabídku na 7 typů modulací, jejichž parametry vstupují do bloku Generate System Parameters, který je sloučí do jednoho datového toku, který je pak využit v celém programu



Obrázek 27: Nastavení modulace

4. Degradace signálu- tato část programu simuluje kvalitu radiového kanálu přenosového systému od vysílače po přijímač. Pro realizaci této funkce je použit blok Apply IQ Impairments a Add AWGN

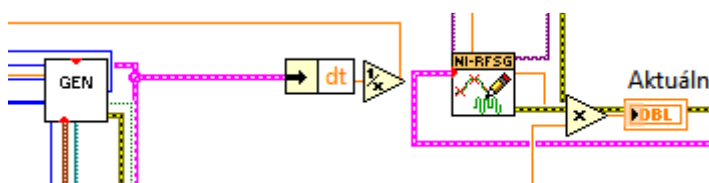
Vytvořený IQ signál je navzorkován (modulátor potřebuje celočíselný počet vzorků) vzorkovací frekvencí:

$$F_R = S_R \cdot S_{PS} \quad [Hz] \quad (28)$$

kde

S_R je symbolová rychlost $[S/s]$

S_{PS} je počet vzorků na symbol



Obrázek 28: Vzorkování signálu

Realizaci tohoto procesu zajišťuje blok NI RFSG Resample and Write, který zároveň signál zapíše do NI PXI 5421 a 5610. Blokem NI RFSG Initiate je aktivováno generování signálu, kterému předchází opuštění konfiguračního módu přístroje PXI. Běh celého programu je řízen časovou smyčkou While Loop, která opakuje funkci programu neustále dokola, dokud jej uživatel nevypne tlačítkem Stop na čelním panelu, nebo nedojde k výskytu chyby.

jiné degradace z kapitoly 2.3. Pro grafické znázornění modulační signálu je použit konstelační diagram

Takto jsem realizoval navržený přenosový systém, schopný plnit základní standardní funkce přenosu dat. Čelní panel přijímače signálu je pro jednoduchost tvořen textovými ovladači a indikátory obrázek 30. Zvolil jsem je pro možnost přesného zadání, čtení požadovaných hodnot, i když existují graficky kvalitněji provedené prvky, ale u těch postrádám přesnost při nastavování hodnot. Čelní panely, bloková schémata vysílače a přijímače jsou v příloze 2.

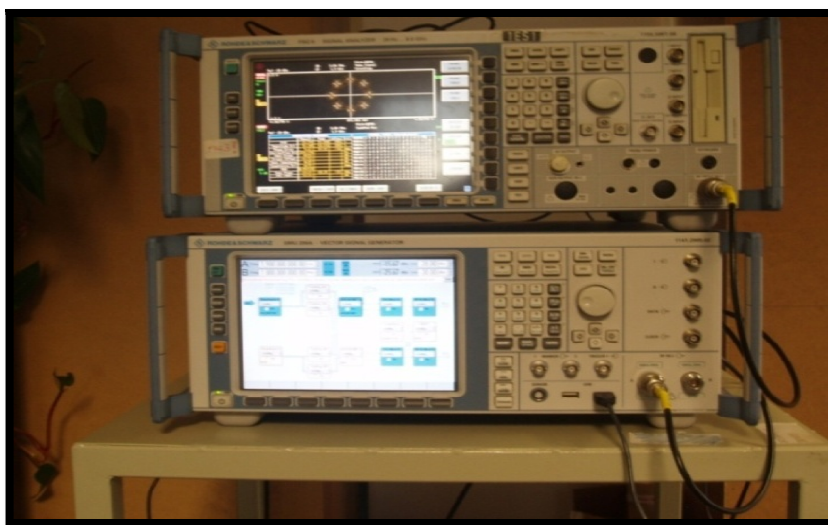
The screenshot shows a software interface for signal quality evaluation. It has three tabs at the top: 'Konstelacni diagram', 'Hodnoty', and 'Chyby ekvalizéru (V^2)'. The 'Hodnoty' tab is active, displaying various measurement parameters in a structured layout.

Měření		MER [dB]		EVM	
Frekvencní offset (Hz)	-45.64	MER [dB]	23.64	RMS (%)	6.57
Frekvencní drift (Hz)	-18.14	Rozdíl amplitud (dB)	NaN	Peak (%)	16.12
Fázový offset (deg)	-5.39	Chyba ortogonalit (deg)	NaN	Peak na symbolu	158
				Individuální měření symbolu (%)	0 / 3.20
Chyba amplitudy				Chyba fáze	
RMS (%)	5.90			RMS (deg)	1.66
Peak (%)	-15.98			Peak (deg)	5.19
Peak na symbolu	158			Peak na symbolu	216
Individuální měření symbolu (%)	0 / -3.20			Individuální měření symbolu (deg)	0 / 0.04
DC offset				BER	
I (%)	-0.04	Posuv počátku (dB)		0.0000	
Q (%)	0.06	-62.61			

Obrázek 30: Vyhodnocení kvality signálu v přijímači

4.6 Ověření funkce navrženého bezdrátového přenosového systému

Cílem ověření bylo zjištění, zda mnou navržený přenosový systém pracuje bez závad, a zda vysílá a přijímá signál odpovídající teoretickým, požadovaným hodnotám. Pro ověření jsem použil speciální přístroje Rohde&Schwarz obrázek 31 :



Obrázek 31: : Měřicí aparatura Rohde&Schwarz

1. Generátor signálu Rohde&Schwarz SMU 200A
2. Analyzátor signálu Rohde&Schwarz FSQ 8

Aparaturu Rohde&Schwarz využiji jako zdroj referenčních hodnot, které následně srovnám s údaji získanými z NI-PXI. Referenční signál má tyto parametry:

1. Referenční úroveň modulovaného signálu -20 dB
2. Nosná frekvence modulovaného signálu 1,96 GHz
3. Šířka pásma modulovaného signálu 3,84 MHz
4. Roll of faktor α filtru root raised cosine 0,33
5. Symbolová rychlost 2,625 MS/s
6. Aplikované digitální modulace: BPSK, QPSK, OQPSK, $\pi/4$ DQPSK, 8 PSK

Srovnání proběhlo dvěma způsoby. Nejdříve jsem generoval ideální signál a část dosažených výsledků zapsal do tabulky 2, kompletní naměřené hodnoty jsou v příloze 3. V druhé části měření byla generátoru přidána degradace signálu ve formě MER. Hodnotu MER jsem ovlivňoval odstupem signálu od šumu pomocí chybovostí E_b/N_0 , podle vztahu (23). Pro vyloučení vlivu okolního prostředí na degradaci a přenos signálu jsem při ověřování použil k propojení přístrojů 50 Ω koaxiální kabely namísto antén. Stejný postup jsem zvolil i pro systém NI- PXI a dosažené hodnoty jsem zapsal do tabulky 2.

Modulace	QPSK- aparatura NI-PXI			QPSK- aparatura R&S		
Degradace signálu	NE RMS	ANO RMS	ANO PEAK	NE RMS	ANO RMS	ANO PEAK
EVM [%]	0,66	11,13	37,58	0,973	12,311	35,933
Chyba amplitudy [%]	0,32	9,34	26,28	0,609	8,921	34,387
Fázový offset [°]	0,33	5,33	17,8	0,44	4,93	20,18
Frekvenční offset [Hz]	-32,9	-41,01		-213,84 k	-213,87 k	
Posuv počátku [dB]	-79,8	-56,6		-57,59	-47,68	
Rozdíl amplitud [dB]	0	0,03		0	-0,01	
MER [dB]	43,63	17,64		40,23	18,19	

Tabulka 2: Srovnání navrženého systému s přístroji R&S

4.7 Ověření reálné funkce navrženého systému

Pro ověření reálných vlastností navrženého systému NI- PXI jsem na výstup vysílací části systému připojil prutovou pasívní všesměrovou WI-FI anténu TP-LINK TL ANT2405C se ziskem 5 dBi a na vstup přijímací části panelovou pasívní sektorovou anténu WI-FI anténu Centurion Wireless Technologies se ziskem 9 dBi. Ve vysílači jsem generoval signál modulovaný modulacemi PSK, QPSK, OQPSK, $\pi/4$ DQPSK a 8PSK na nosné frekvenci 2,4 GHz, výkonová úroveň signálu 10 dBm se šířkou pásma 3,84 MHz. Na straně přijímače jsem vyhodnocoval kvalitu přijímaného signálu měřeními BER, EVM a MER. Změřené RMS hodnoty parametrů modulací jsou uvedeny v tabulce 3.

Modulace	BPSK	$\pi/4$ DQPSK	OQPSK	QPSK	8PSK
EVM [%]	6,57	6,67	6,88	6,42	6,54
BER	1E-7	1E-7	1E-7	1E-7	1E-7
MER [dB]	23,67	23,52	23,25	23,85	23,96
Střední výkon [dBm]	-14,85	-15,09	-14,51	-14,35	-14,9
Frekvenční offset [Hz]	-45,64	-44,29	-36,38	-38,39	-32,4
Fázový offset [°]	1,66	2,77	2,61	2,55	2,74
Chyba amplitudy [%]	5,9	4,6	5,21	4,63	4,46
Posuv počátku [dB]	-62,61	-45,29	-69,11	-58,01	-66,2
Rozdíl amplitud [dB]	0	-0,04	0	-0,03	-0,05

Tabulka 3: Reálné hodnoty pro různé modulace získané rádiovým přenosem

5 Vyhodnocení dosažených výsledků

Srovnáním referenčních hodnot získaných aparaturou Rohde&Schwarz s hodnotami ze systému NI-PXI jsem získal informaci funkčnosti aparatury. V tabulce 2 jsou zobrazeny hodnoty signálu modulovaného modulací QPSK, změřené oběma systémy. Ostatní naměřené hodnoty jsou v příloze 3.

Parametry charakterizující kvalitu signálu nebo přenosového systému, jsou určeny pro skupinu generátorem vysílaných impulzů signálu, která je pro přijetí analyzátozem uložena a následně porovnávána s ideálním- vypočteným signálem. Nejdůležitější jsou parametry:

1. Fázový offset
2. Velikost chybového vektoru EVM
3. Chyba amplitudy

Tyto tři parametry jsou spočteny jako funkce času. Měříme jejich efektivní a špičkové hodnoty. Kromě parametrů v časové oblasti, lze měřit i skalární parametry signálu:

4. Posuv počátku
5. Rozdíl amplitud
6. Frekvenční offset

Těchto 6 měření patří mezi základní, které jsou prvotními indikátory kvality signálu. Ostatní parametry z kapitoly 2.3 jsou doplňkovými měřeními a nemusí být dostupné ve všech přístrojích v základní verzi, výrobci přístrojů z pravidla umožňují měřit další parametry zakoupením softwarových, hardwarových doplňků. Tento fakt je zohledněn v příloze 3, která se liší různými měřeními parametry pro obě aparatury. Před rozбором získaných hodnot je potřeba uvést, že nesrovnám kvalitu jednotlivých modulací nebo neurčuji která z nich je lepší, protože při měření parametrů signálu zjišťujeme odchylky od ideálních veličin (ty jsem získal přístroji Rohde&Schwarz), které jsou pro každou modulaci a přenosový standard jiné. Platí, že jednoduchá modulace BPSK používá dva stavy (symboly) vyjádřené jedním bitem. Prostor pro každý symbol v konstelačním diagramu je π/M , kde M je počet symbolů v konstelačním diagramu. Z hlediska správného vyhodnocení přijatých symbolů je tedy BPSK ideální. Nevýhodou této modulace je nízká datová rychlost (12) vzhledem k šířce pásma. Naopak složitější modulace např. $\pi/4$ DQPSK používá 8 symbolů vyjádřenými dvěma identickými konstelacemi (pomocí 2 bitů), které mezi sebou rotují ve vzájemném posunu 45° . Takto je zároveň omezen maximální fázový posun mezi symboly konstelace na 135° . Tím dosahuje vysoké úrovně odolnosti proti degradacím, a zároveň má poměrně slušnou datovou rychlost. Modulace 8PSK využívá 8 symbolů vyjádřených 3 bity, proto dosahuje vysoké datové rychlosti na úkor robustnosti signálu- prostor pro správnou detekci symbolů je $\pi/8$. Je vhodná pro

přenosové systémy na krátké vzdálenosti, nebo do prostředí s výborným odstupem signálu od šumu. Z toho vyplývá, že modulace 8-PSK má číselně nejnižší ideální hodnoty měřených parametrů a naopak BPSK může dosahovat větších odchylek, ale přitom může být kvalita přijímaných dat stejná. Rozdíl v kvalitě modulací se tedy pozná například s degradací signálu, nebo dosaženými datovými rychlostmi.

Z tabulky 2 a přílohy 3 je vidět nepatrné rozdíly hodnot mezi oběma systémy. Mezi sebou se viditelně liší dosaženým frekvenčním offsetem a posuvem počátku (25). Ostatní měřené parametry jsou s přihlédnutím k výrobcí [7] [12] deklarovanými přesnostmi shodné. Celkově menších odchylek dosahoval systém NI-PXI, a to jak u signálu s degradací nebo bez. Přesnost PXI je z velké části ovlivněná vhodně navrhnutým přenosovým systémem „Vysílač a Přijímač“. K přesnosti měření je zapotřebí mít na paměti to, že sami výrobci upozorňují uživatele prostřednictvím webových stránek nebo návodu, na skutečnost, že přesnost je do velké míry ovlivněná použitým firmwarem nebo softwarem (ovladačem) přístroje. U aparatury NI-PXI toto platí dvojnásob, vzhledem k softwarové povaze přístroje.

Reálné hodnoty v tabulce 3 získané rádiovým přenosem z kapitoly 4.7 jsou na pomezí mezi ideálními a degradačními hodnotami. Hodnoty parametrů signálu se mezi sebou v extrému moc neliší, vliv modulace na kvalitu signálu zde není viditelně patrný. Hodnota BER nepřekročila hranici 10^{-3} , která je obecně považována za strop použitelnosti. Dalším, stejně důležitým parametrem je EVM, jehož hodnota se pohybovala okolo 6,5 % pro všechny modulace, což je vynikající hodnota- například standard ZigBee na frekvenci 2,4 GHz (modulace OQPSK) doporučuje strop použitelnosti EVM do 35% [19].

Srovnávacím měřením jsem ověřil správnou funkčnost navrženého systému přenosu dat. Navržený systém v testu prokázal nulovou degradaci přenášeného signálu a naměřené hodnoty se shodují s daty získanými speciálními měřicími přístroji R&S. Tímto považuji systém za ověřený a plně funkční. Modulárním systémem NI-PXI jsem vytvořil funkční přenosový systém, který je rovnocenným nástrojem k specializovaným přístrojům.

6 Závěr

Diplomová práce se zabývá problematikou generování a analýzy signálů používaných pro bezdrátové přenosové systémy. V teoretické části jsem popsal a rozebral všechny důležité aspekty související s přenosem dat, zejména degradace, které vznikají při přenosem signálu. Velký prostor jsem věnoval přístrojům pro generování a analýzu bezdrátových signálů. Praktická část se věnuje návrhu a ověření funkčnosti systému pro přenos dat s využitím různých digitálních modulací signálu.

Hlavní přínos práce spočívá v seznámení s nepříliš rozšířenými přístroji, kterým se říká „Virtuální přístroje“ v aplikační oblasti bezdrátových přenosových systémů, myšlenka funkčnosti takovýchto přístrojů vychází z definice softwarového rádia. Ta chápe hardware přenosového systému jako univerzální obecné koncipované zařízení. Základní funkce přenosového systému jsou tvořeny softwarem, který lze pružně měnit podle potřeb uživatele. Takovýto přístroj lze postavit na bázi PXI modulárního systému s využitím vývojového prostředí LabView, které využívá flexibilní programovací jazyk G s rozsáhlými knihovnami funkcí.

Na této platformě jsem navrhnul a realizoval z různých hardwarových komponentů funkční bezdrátový přenosový systém. Další a podstatná část mé diplomové práce spočívala v návrhu softwaru tohoto funkčního systému pro bezdrátový přenos dat, který vychází z obecného komunikačního řetězce. Obsahuje dvě samostatné části: vysílací a přijímací. Vysílač i přijímač umožňují změnu parametrů digitálně modulovaného signálu tak, aby bylo možné těmito přístroji demonstrovat základní principy bezdrátového přenosu dat pro různé přenosové systémy bez nutnosti měnit hardware přístroje. Funkčnost systému byla ověřena srovnáním s referenčním signálovým generátorem a analyzátozem renomované firmy Rohde&Schwarz. Ověřením jsem prokázal rovnocennost mnou navrženého systému s těmito tradičními přístroji a systémy. Srovnání ukazuje pouze minimální rozdíly v naměřených hodnotách degradací a odchylek, které jsou ve výrobcem povolených tolerancích. Virtuálním přístrojům patří budoucnost, zvláště v odvětví zabývající se problematikou přenosu dat, kde je nejprogresivnější nástup nových technologií.

Literatura

- [1] Žalud, V.: Radioelektronika. Vydavatelství ČVUT, Žitkova 4, 166 35 Praha 6, 1993.
- [2] Seibt, A.: Osciloskopy od a do z. Nakl. HEL, Ostrava 2000
- [3] Sýkora, J.: Digitální rádiová komunikace II. Vydavatelství ČVUT, Praha 1995.
- [4] Uhlíř, J., Sovka, P.: Číslíkové zpracování signálů. Ediční středisko ČVUT Praha, 1995
skriptum ČVUT FEL, ISBN 80-01-01303-3
- [5] Davídek, V., Sovka, P.: Číslíkové zpracování signálů a implementace. Ediční středisko
ČVUT Praha, 1996 skriptum ČVUT FEL, ISBN 80-01-01530-0
- [6] Žídek, J.: Grafické programování ve vývojovém prostředí LabVIEW. Výuková skripta,
Ostrava 2005
- [7] <http://www.ni.com/rf/>
- [8] <http://www.freshpatents.com/In-phase-and-quadrature-phase-signal-amplitude-and-phase-calibration-dt20091126ptan20090291649.php>
- [9] <http://matlab.feld.cvut.cz/search.php?rsvelikost=sab&rstext=all-phpRS-all&rstema=16&stromhlmenu=16>
- [10] <http://www.mwrf.com/Articles/Index.cfm?Ad=1&ArticleID=13004&pg=6>
- [11] <http://standards.ieee.org/getieee802/portfolio.html>
- [12] <http://www.rohde-schwarz.cz/cz/>
- [13] http://www.urel.feec.vutbr.cz/web_pages/projekty/clanky/Ricny_Digizone08.pdf
- [14] <http://www.filter-solutions.com/raised.html>
- [15] <http://www.umts.wz.cz/>
- [16] <http://news.auto.cz/aktuality/dalkove-startovani-modelu-gm-cim-dal-popularnejsi.html>
- [17] http://radio.feld.cvut.cz/courses/X37KTR/oldv/3_Digitalni_modulace.pdf
- [18] <http://www.internetprovsechny.cz/blesk.php?cbl=321>
- [19] <http://standards.ieee.org/getieee802/802.15.html>
- [20] http://www.horevaj.com/horevaj/K4_files/K4_88.pdf

Seznam příloh

Příloha 1 – Použité měřicí přístroje a jejich základní parametry	47
Vysílač NI PXI.....	47
Přijímač NI PXI	47
Analyzátor R&S FSQ8	48
Generátor R&S SMU200A	48
Příloha 2 – Čelní a blokové panely	50
Čelní panel vysílače	50
Blokový panel vysílače	51
Čelní panel přijímače	52
Blokový panel přijímače- první část	53
Blokový panel přijímače- druhá část	54
Příloha 3 – Tabulky naměřených hodnot	55
Hodnoty naměřené aparaturou NI-PXI.....	55
Hodnoty naměřené aparaturou NI-PXI.....	55
Hodnoty naměřené aparaturou NI-PXI.....	56
Hodnoty naměřené aparaturou Rohde&Schwarz	56
Hodnoty naměřené aparaturou Rohde&Schwarz	57
Hodnoty naměřené aparaturou Rohde&Schwarz	57
Příloha 4 - CD s virtuálním vysílačem a přijímačem přiloženo v kapse diplomové práce	

Příloha 1 – Použité měřicí přístroje a jejich základní parametry

Vysílač NI PXI

Výrobní čísla komponent systému P/N 191238C-01, S/N V08X01E11

Osmi slotová skříň NI PXI 1042Q

Vysílač NI PXI 5610

Generátor NI PXI 5421

Základní parametry:

- Frekvenční rozsah 250 kHz až 2.7 GHz
- Zesílení 130 dB
- Šířka pásma 20 MHz (v reálném čase), 43MHz (s interpolací)
- Počet RF výstupů 1
- Vzorovací frekvence 100 MS/s (v reálném čase), 400MS/s (s interpolací)
- Amplitudový rozsah až 12 V (špička špička)
- Výstupní impedance 50 Ω , 75 Ω nastavení softwarově
- Přesnost DC 0,4 % z požadované amplitudy $\pm 0,05$ % odchylka ± 1 mV (špička špička)
- Přesnost AC ± 1 % z požadované amplitudy ± 1 mV (špička špička)
- Rozlišení DAC 16 bit
- Operační teplota 15 až 35 °C
- SFDR 91 dB v 10 MHz
- Paměť 256 MB pro 134 217 600 vzorků

Přijímač NI PXI

Výrobní čísla komponent systému P/N 188129B-01, S/N V06x419C5

Osmi slotová skříň 1042

Přijímač NI PXI 5600

Digitizér NI PXI 5142

Základní parametry:

- Frekvenční rozsah 9 kHz až 2.7 GHz
- Šířka pásma 20 MHz (v reálném čase),
- Počet RF vstupů 1
- Vzorovací frekvence 100 MS/s (v reálném čase)

- Amplitudový rozsah až 10 nebo 42 V (špička špička)
- Vstupní impedance $50 \pm 2\%$ nebo $1 \pm 0,75\% M\Omega$, nastavení softwarově
- Přesnost DC $0,65\%$ ze vstupního rozsahu + 1 až 15 mV podle vstupního rozsahu (špička špička)
- Přesnost AC $\pm 0,06$ až $\pm 0,09$ dB podle vstupní impedance (špička špička)
- Rozlišení DAC 14 bit
- Operační teplota 15 až 35 °C
- Vstupní výkon maximálně 30 dB
- SFDR 65 až 75 dB v 10 MHz (podle vstupního napětí)
- Paměť 256 MB pro 128 MS/S (přibližně 100 000 vzorků)

Analyzátor R&S FSQ8

Výrobní číslo 100098

Základní parametry:

- Frekvenční rozsah 20 Hz až 8 GHz
- Šířka pásma 28 MHz (v reálném čase),
- Počet RF vstupů 1
- Vzkovovací frekvence 81,6 MS/s (v reálném čase)
- Amplitudový rozsah až 5,62 mV (špička špička)
- Vstupní impedance 50 Ω nebo 1 M Ω
- Přesnost výstupního napětí 0,15% ze vstupního rozsahu $\pm 0,2$ mV (špička špička)
- Rozlišení DAC 14 bit
- Operační teplota 5 až 40 °C
- Vstupní výkon maxim. 30 dB
- SFDR 80 dB v 2 MHz
- Paměť 16MS pro každou část I/Q dat

Generátor R&S SMU200A

Výrobní číslo 100978

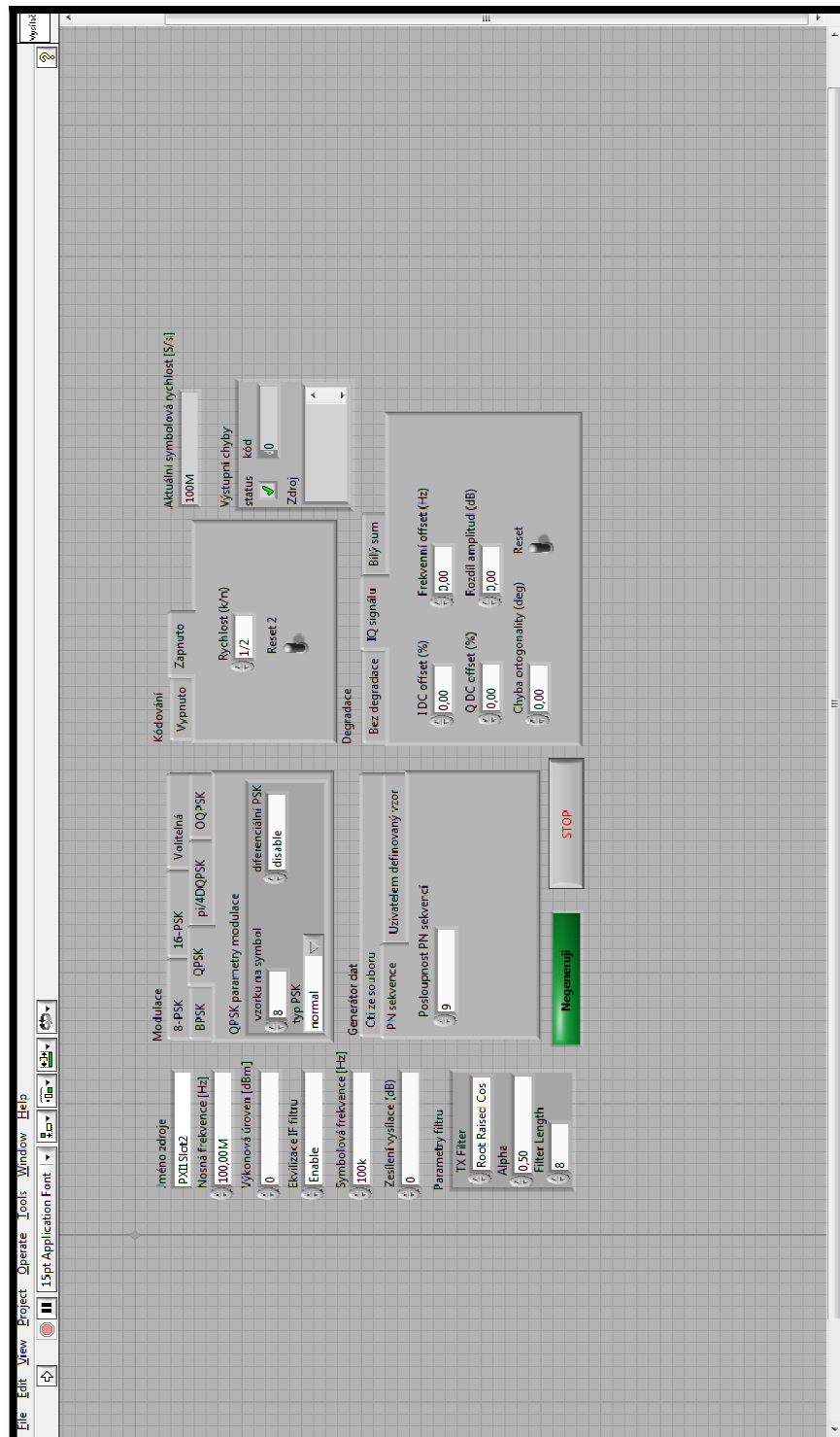
Základní parametry:

- Frekvenční rozsah 100 kHz až 3 GHz
- Výstupní výkon až 27dB

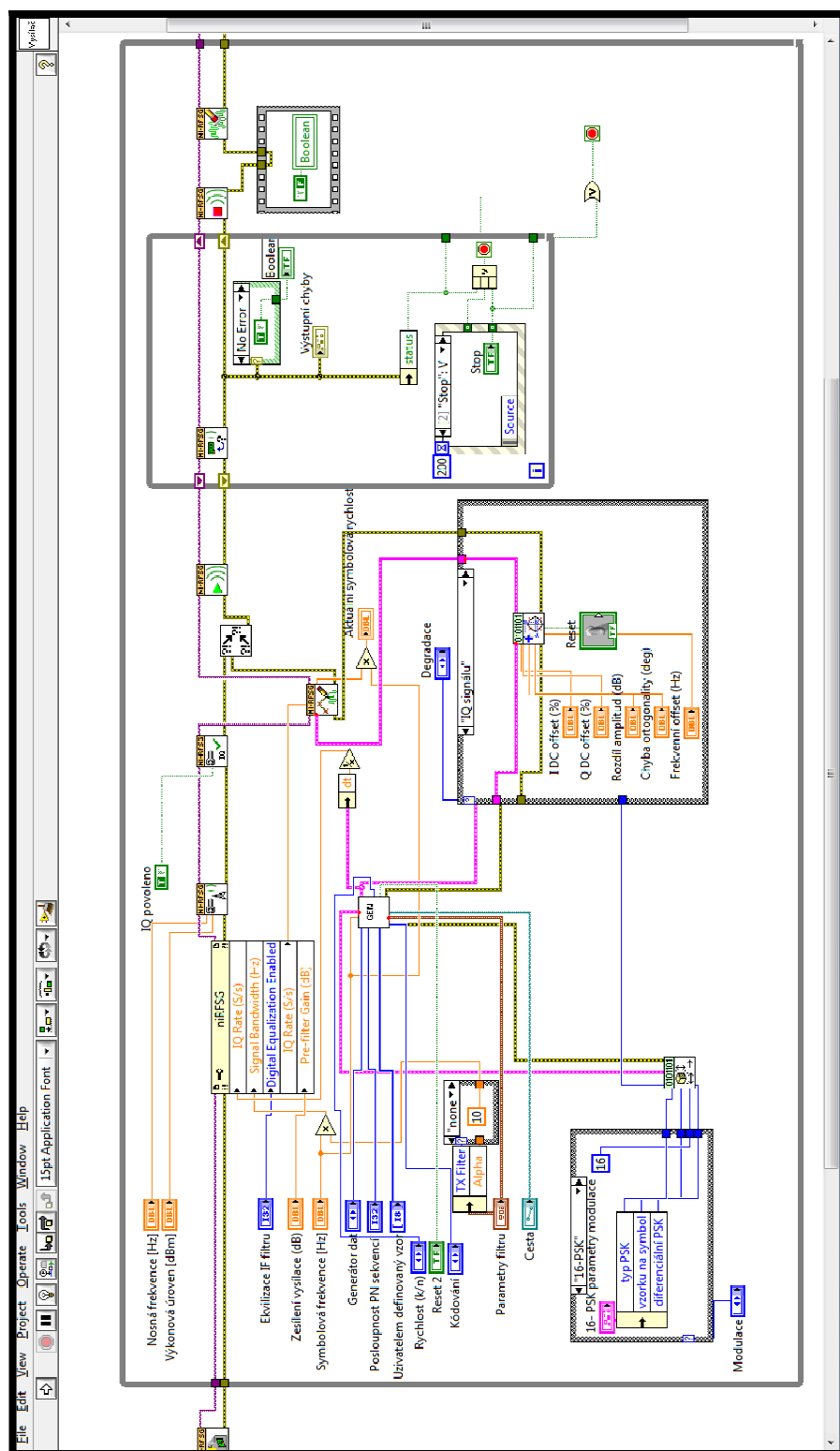
- Šířka pásma 200 MHz
- Počet RF výstupů 1
- Vzorkovací frekvence 100 MS/s (v reálném čase). 400MS/s (s interpolací)
- Amplitudový rozsah až 4 V (špička špička)
- Výstupní impedance 50 Ω
- Přesnost výstupního napětí 1 % z požadované amplitudy + 4mV (špička špička)
- Rozlišení DAC 16bit
- Operační teplota 5 až 45 °C
- SFDR 70 dB v 2 MHz, 60 dB v 20MHz
- Paměť 128 MS

Příloha 2 – Čelní a blokové panely

Čelní panel vysílače



Blokový panel vysílače



Čelní panel přijímače

File Edit View Project Operate Tools Window Help

15pt Application Font

Priloha

Číslo vysílce: 1
 Jméno digitizéru: DAQ-2
 Nosná frekvence [Hz]: 100,00M
 Výkonová úroveň [dBm]: 0

Počet symbolů: 1000
 Symbolová frekvence, Hz: 100,00k
 Parametry filtru:
 TX Filter: Root Raised Cos
 Alpha: 0.50
 Filter Length: 8

Zapni ekvalizér: ☒ Počet kroků: 11

Zpetinovazební ekvalizér (LMS) parametry:
 Kroky na symbol: 1
 Trvalá sekvence: 1
 Tréninková sekvence: 0.01

Konstelční diagram: Hodnoty: Chyby evalizéru (V²/2):

Měření:
 Frekvencí offset (Hz): 0.0000
 MER [dB]: 44.53
 Frekvencí drift (Hz): 0.76
 Fázový offset (deg): 64.31

rho: 0.0000
 MER [dB]: 44.53
 Rozdíl amplitud (dB): 0.00
 Chyba ortogonality (deg): -0.01

Chyba amplitudy:
 RMS (%): 0.00
 Peak (%): 0.00
 Peak na symbolu: 0

Individuální měření symbolu (%): 0.00

Chyba fáze:
 RMS (deg): 0.00
 Peak (deg): 0.00
 Peak na symbolu: 0

Individuální měření symbolu (deg): 0.00

Chyby evalizéru (V²/2):
 RMS (%): 0.59
 Peak (%): 1.78
 Peak na symbolu: 164

Individuální měření symbolu (%): 0.00

Vstupní:
 Výkon RMS (dBm): -21.13
 Výkonová rezerva [dB]: 18.14
 Šířka pásma, Hz: 165,00k
 Status: OK

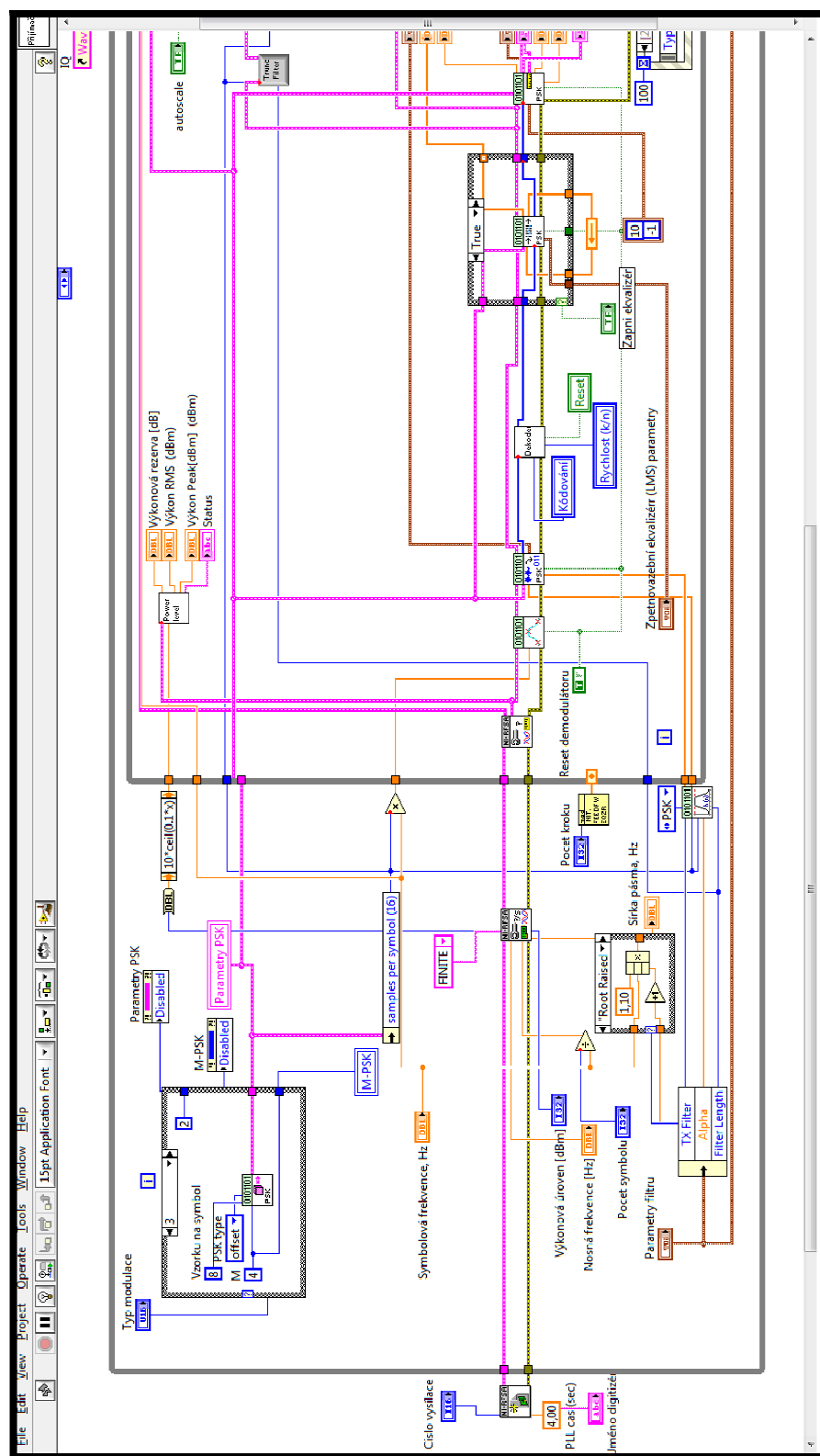
Výstupní chyby:
 status: ☒
 Kód: 0
 Zdroj:

Kódování:
 Vypnuto
 Zapnuto

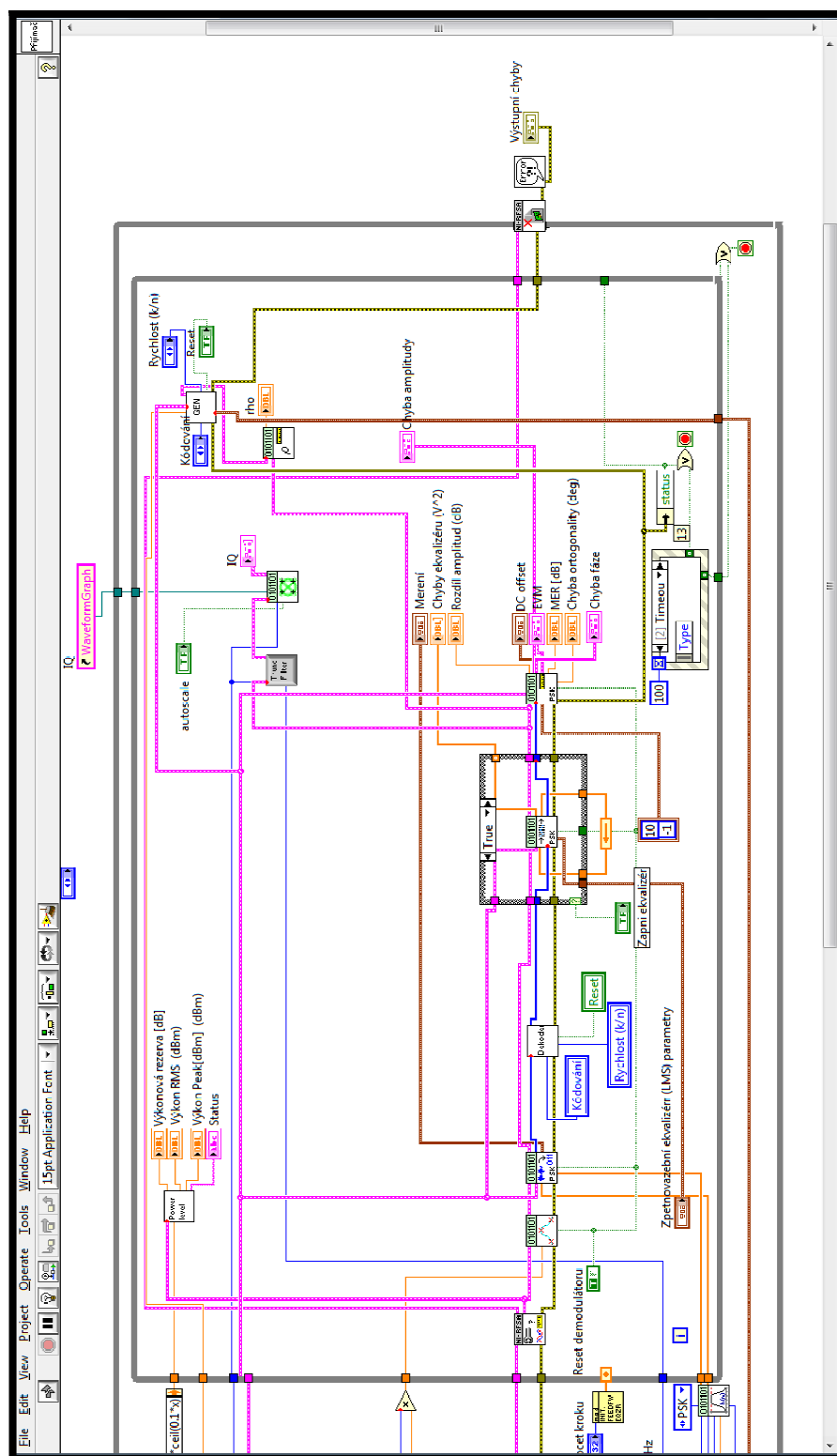
Typ modulaace: QPSK
 Parametry PSK:
 samples per symbol (16): 8
 differential PSK: disable
 symbol map: 0.707 +j0.707i
 PSK type: normal
 M-PSK: 4

STOP

Blokový panel přijímače- první část



Blokový panel přijímače- druhá část



Příloha 3 – Tabulky naměřených hodnot

Hodnoty naměřené aparaturou NI-PXI

Modulace	BPSK			QPSK		
Degradace signálu	NE	ANO RMS	ANO PEAK	NE	ANO RMS	ANO PEAK
EVM [%]	0,67	20,38	49,04	0,66	11,13	37,58
Chyba amplitudy [%]	0,34	14,47	-41,71	0,32	9,34	-26,28
Fázový offset [°]	0,27	8,63	32,10	0,33	5,33	17,8
Frekvenční offset [Hz]	-39,15	-27,58		-32,89	-41,01	
Frekvenční drift [Hz]	15,19	-14,83		-16,18	-12,97	
Posuv počátku [dB]	-79,21	-50,33		-79,83	-56,6	
Rozdíl amplitud [dB]	0	0		0	0,03	
Chyba ortogonalit [°]	0	0		0,01	-0,26	
Střední výkon [dBm]	-19,91	-20,9	-14,83	-19,93	-20,29	-15,3
MER [dB]	43,54	13,82		43,63	17,64	

Hodnoty naměřené aparaturou NI-PXI

Modulace	OQPSK			$\pi/4$ DQPSK		
Degradace signálu	NE	ANO RMS	ANO PEAK	NE	ANO RMS	ANO PEAK
EVM [%]	2,08	13,01	34,32	0,67	12,47	37,08
Chyba amplitudy [%]	1,79	9,18	-31,91	0,3	8,74	-37,06
Fázový offset [°]	1,82	9,76	-27,59	0,38	5,19	-15,99
Frekvenční offset [Hz]	-36,49	-27,78		-36,49	-33,95	
Frekvenční drift [Hz]	6,38	2,04		6,38	-61,36	
Posuv počátku [dB]	-72,55	-46,32		-67,47	-52,13	
Rozdíl amplitud [dB]	0	-0,05		0	-0,08	
Chyba ortogonalit [°]	0	0		0	-0,2	
Střední výkon [dBm]	-19,92	-20,32	-16,11	-19,93	-20,27	-15,87
MER [dB]	33,63	17,71		43,48	18,08	

Hodnoty naměřené aparaturou NI-PXI

Modulace	8 PSK		
Degradace signálu	NE	ANO RMS	ANO PEAK
EVM [%]	0,54	12,13	29,18
Chyba amplitudy [%]	0,28	8,72	-29,13
Fázový offset [°]	0,37	5,07	-17,28
Frekvenční offset [Hz]	-34,22	-31,42	
Frekvenční drift [Hz]	-20,65	-6,17	
Posuv počátku [dB]	-76,58	-48,49	
Rozdíl amplitud [dB]	0	0,12	
Chyba ortogonalit [°]	-0,05	-1,32	
Střední výkon [dBm]	-19,93	-20,3	-16,04
MER [dB]	45,4	18,32	

Hodnoty naměřené aparaturou Rohde&Schwarz

Modulace	BPSK			QPSK		
Degradace signálu	NE	ANO RMS	ANO PEAK	NE	ANO RMS	ANO PEAK
EVM [%]	1,078	21,118	64,554	0,973	12,311	35,933
Chyba amplitudy [%]	0,331	14,845	54,621	0,609	8,921	34,387
Fázový offset [°]	0,59	8,88	36,72	0,44	4,93	-20,18
Frekvenční offset [kHz]	-253,6	-251,3		-213,8	-213,87	
Pokles amplitudy [dB]	0	-0,19		0	0,18	
Posuv počátku [dB]	-60,14	-41,43		-57,59	-47,68	
Rozdíl amplitud [dB]	0	0		0	-0,01	
Chyba ortogonalit [°]	0	0		0	0,64	
RHO	0,9999	0,9554		0,9999	0,98485	
Střední výkon [dBm]	-34,59	-34,26	-27,66	-24,73	-24,99	-19,42
MER [dB]	39,34	13,51		40,23	18,19	

Hodnoty naměřené aparaturou Rohde&Schwarz

Modulace	OQPSK			$\pi/4$ DQPSK		
Degradace signálu	NE	ANO RMS	ANO PEAK	NE	ANO RMS	ANO PEAK
EVM [%]	1,185	12,431	30,756	1,321	12,028	31,257
Chyba amplitudy [%]	0,617	8,736	28,862	0,645	8,384	29,39
Fázový offset [°]	0,67	5,99	-23,42	0,66	4,98	-15,41
Frekvenční offset [kHz]	-213,8	-213,72		-213,5	-213,43	
Pokles amplitudy [dB]	0,01	0,02		-0,01	0,09	
Posuv počátku [dB]	-57,99	-40,98		-56,73	-42,95	
Rozdíl amplitud [dB]	0	0,03		-0,01	0,01	
Chyba ortogonalita [°]	-0,03	-0,02		0,01	0,4	
RHO	0,9998	0,98341		0,9998	0,98553	
Střední výkon [dBm]	-24,73	-24,81	-19,55	-25,06	-25,24	-19,34
MER [dB]	37,52	18,11		37,58	18,4	

Hodnoty naměřené aparaturou Rohde&Schwarz

Modulace	8 PSK		
Degradace signálu	NE	ANO RMS	ANO PEAK
EVM [%]	1,017	12,259	29,513
Chyba amplitudy [%]	0,624	8,797	24,558
Fázový offset [°]	0,46	4,95	16,83
Frekvenční offset [kHz]	-213,7	-213,63	
Pokles amplitudy [dB]	0	0,09	
Posuv počátku [dB]	-53,33	-54,68	
Rozdíl amplitud [dB]	0	0,03	
Chyba ortogonalita [°]	-0,05	-0,03	
RHO	0,999	0,98497	
Střední výkon [dBm]	-24,92	-25,05	-19,58
MER [dB]	39,85	18,23	